Управление тяжелыми авариями на АЭС с ВВЭР

В.Г. АСМОЛОВ,
Н.Н. ПОНОМАРЕВ-СТЕПНОЙ,
В.А. СИДОРЕНКО

РНЦ
КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ

РАЗВИТИЕ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС
исходные события

ПОТЕРЯ ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

ПРИНЦИП ЭШЕЛОНИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ

- →***многообразие барьеров безопасности***
- →***многообразие уровней защиты барьеров безопасности***
  - – ***предотвращение аварии***
  - – ***уменьшение последствий аварии (управление аварией)***

НЕКОНТРОЛИРУЕМЫЙ РОСТ МОЩНОСТИ

→***ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ АВАРИИ (в проекте АЭС должно быть доказано непревышение порогов разрушения твэлов)***

→ ***НЕВОЗМОЖНОСТЬ ПРИНЯТИЯ МЕР ПО УПРАВЛЕНИЮ АВАРИЕЙ***

РЕАКТИВНОСТНЫЕ АВАРИИ

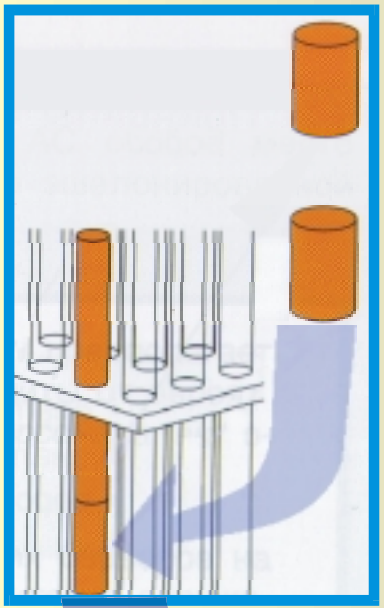
Для аварий с потерей охлаждения активной зоны реактора реализация принципа эшелонирования защиты происходит за счет:

- Обоснованности мер по предотвращению аварий, предусмотренных проектом АЭС;
- Обоснованности мер по уменьшению последствий аварии, если из-за наложения отказов систем безопасности или ошибок оператора сверх принципа единичного отказа превышаются проектные пределы безопасности (управление аварией).

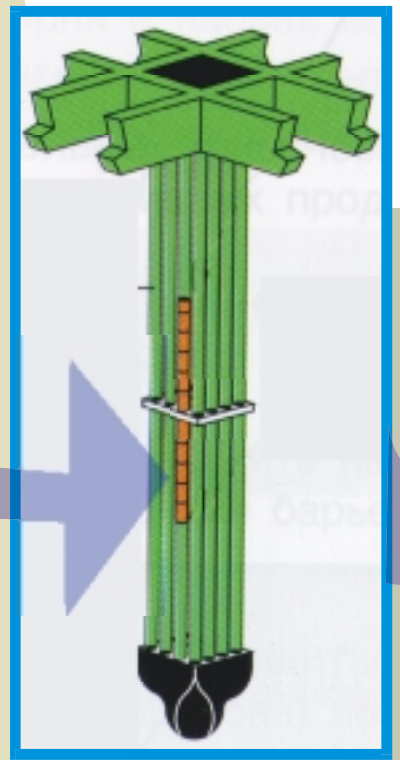
Развитие тяжелой аварии с потерей охлаждения на АЭС ВВЭР представляет собой последовательность состояний АЭС, в которой каждое следующее состояние является более тяжелым, т.е. характеризуется большим разрушением барьеров безопасности, чем предыдущее

БАРЬЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

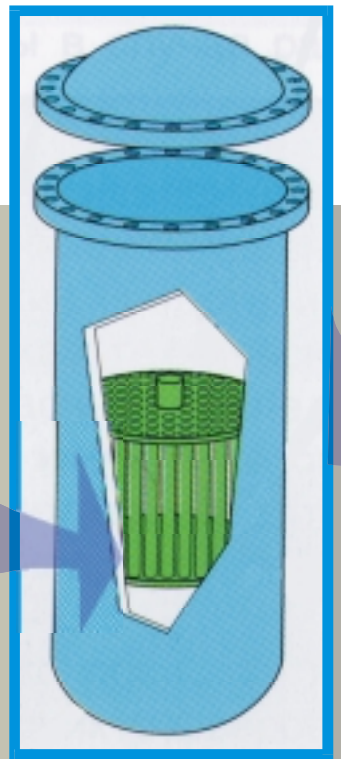
1-й барьер
топливная матрица



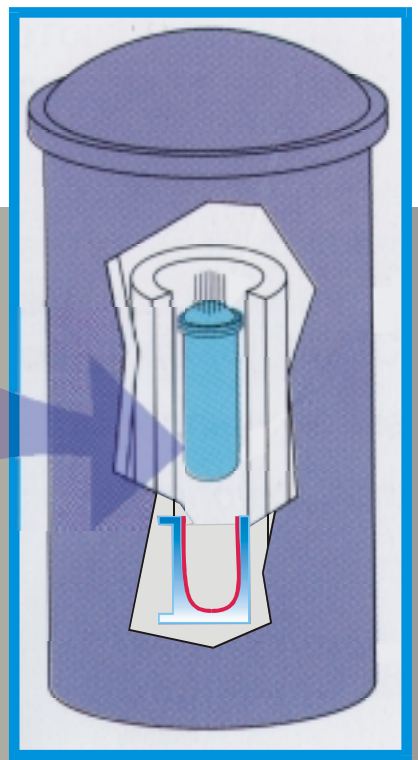
2-й барьер
оболочка твэла



3-й барьер
корпус реактора



4-й барьер
защитная оболочка



Последовательность состояний (стадий) развития аварии:

Потеря эффективного охлаждения АЗ;

Плавление АЗ,
перемещение расплава на днище корпуса,
образование бассейна расплава;

Выход расплава за пределы
корпуса реактора;

Повреждение ЗО и
выход ПД за ее пределы.

**Для каждого состояния аварии
может быть определена
своя специфическая цель безопасности,
на достижение которой должны быть направлены
стратегия и тактика управления авариями:**

Предотвращение повреждения топлива;

Удержание топлива в корпусе реактора;

Предотвращение повреждения защитной оболочки.

РАЗВИТИЕ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС (I стадия)
ДЕГРАДАЦИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА

ПРОЦЕССЫ И СОБЫТИЯ	*ЦЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ АВАРИЕЙ*	*МЕРЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ АВАРИЕЙ*
• Потеря охлаждения зоны • Осушение и разогрев АЗ, достижение проектных пределов безопасности • Паро-циркониевая реакция, эскалация роста температуры твэлов, выход водорода и ПД из газового зазора • Взаимодействие топливо-оболочка, стекание оболочки, блокировка сечения металлическим расплавом • Плавление топлива, выход ПД из топлива, стекание расплава на днище корпуса реактора	**Предотвратить плавление активной зоны реактора (Сохранить целостность I и II барьеров безопасности)**	Восстановление охлаждения • Система аварийного охлаждения АЗ • Отвод тепла через I контур • Отвод тепла через II контур

РАЗВИТИЕ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС (II стадия)
РАЗРУШЕНИЕ КОРПУСА РЕАКТОРА

ПРОЦЕССЫ И СОБЫТИЯ	*ЦЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ АВАРИЕЙ*	*МЕРЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ АВАРИЕЙ*
• Образование бассейна расплава на днище корпуса реактора • Взаимодействие расплав – корпус реактора • Разрушение корпуса	Удержать расплав в корпусе реактора (Сохранить целостность III барьера безопасности)	• Поддерживать возможный отвод тепла от обломков АЗ внутри корпуса • Затопление бетонной шахты реактора водой (внешнее охлаждение)

РАЗВИТИЕ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС (III стадия)
РАЗРУШЕНИЕ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ

ПРОЦЕССЫ И СОБЫТИЯ	*ЦЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ АВАРИЕЙ*	*МЕРЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ АВАРИЕЙ*
• Взаимодействие расплав-вода в шахте (паровой взрыв?) • Взаимодействие расплав-бетон, выход водорода, не-конденсирующихся газов, аэрозолей, ПД • Горение и детонация взры-воопасных смесей водоро-да • Прямой нагрев защитной оболочки • Переопрессовка защитной оболочки	**Предотвратить повреждение защитной обо-лочки (Сохранить це-лостность IV барьера безо-пасности)**	• Создание устройства локализации распла-ва (ловушки) под ре-актором • Создание системы водородной безопас-ности (дожигатели, рекомбинаторы, инертизация атмо-сферы защитной оболочки) • Сброс давления и фильтрация выброса • Дополнительное ох-лаждение (спринкле-ры)

Проектные аварии

Событие	Определяющие факторы	Определяющие параметры	Расчетный инструмент	Комментарий
Разогрев активной зоны	• Истечение через разрыв; • Гидродинамика и теплообмен в корпусе реактора при действии активных и пассивных систем САОЗ; • Наличие воды в I контуре и возможность ее поступления в корпус; • Теплоотвод ко II контуру; • Гидродинамика ГЦТ трубопровода при остановленных ГЦН (ЕЦ)	• Скорость истечения через разрыв; • $T_{АЗ}=f(\tau)$, °С; • $P_{I,IIк}= f(\tau)$, МПа; • наличие неконденсируемого газа	**Детальный анализ** ТРАП RATEG RELAP CATHARE ATHLET	*Совокупный набор расчетного инструмента позволяет адекватно оценить процесс*

При разработке технических требований к системам безопасности по управлению запроектными авариями предлагается использовать равновзвешенный подход, основанный на:

- исключении из рассмотрения исходных событий, вероятность которых заведомо меньше 10^{-7};
- реалистической оценке ключевых параметров процессов, полученных с использованием сквозного моделирования при помощи детальных расчетных кодов “улучшенной оценки”.

Запроектные аварии

1-я фаза – плавление АЗ

Событие	Определяющие факторы	Определяющие параметры	Расчетный инструмент	Комментарий
Эскалация роста температуры АЗ, нарушение целостности оболочки твэла, образование расплава в пределах АЗ	• Окисление оболочки твэла и материалов ВКУ; • Влияние материалов стержней регулирования; • Взаимодействие топливо-оболочка; • Плавление оболочки; • Гидролиз воды; • Блокировка проходного сечения металлическим расплавом; • Плавление топлива; • Выход ПД из газового зазора и топлива; • Взаимодействие расплава с конструкционными материалами; • Обрушение опорной дистанционирующей решетки, блока защитных труб и выгородки; • Выход расплава за пределы АЗ.	• $T_{АЗ}=f(\tau)$, °С; • Коэффициенты скорости протекания физ-хим. реакций; • $H_2=f(\tau)$, кг; • $P_{I.к}=f(\tau)$, МПа; • Динамика уровня и массы оставшегося теплоносителя; • Выход ПД и их перенос по контуру; • $M_{расплава}=f(\tau)$, кг; • Композиция расплава. • Тепловые потери от АЗ; • Скорость стекания расплава; • Теплоотдача при стекании; • Радиальное перемещение материалов.	**Детальный анализ** RATEG/СВЕЧА CATHARE-ICARE RELAP-SCDAP **Быстрая оценка** MARCH-ВВЭР MELCOR ESCADRE-ВВЭР MAAP-ВВЭР	Оценка на уровне мировых стандартов. **Проблемы:** • перемещение расплава на днище корпуса; • выход ПД, оценка остаточного энерговыделения; • степень окисления; • оценка радиального перемещения.

ПРОГРАММА CORA - ВВЭР

ЦЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ АВАРИЕЙ

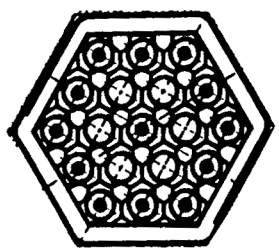
Предотвратить разрушение активной зоны при потере охлаждения

ЦЕЛЬ ПРОГРАММЫ

Проверка возможности использования базы данных CORA PWR и BWR для верификации реакторных кодов для ВВЭР

КЛЮЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

- *осушение и перегрев АЗ*
- *высокотемпературное окисление оболочек твэл*
- *взаимодействие топливо - оболочка*
- *выход водорода*
- *плавление и стекание материалов АЗ*
- *образование блокад*



СТРУКТУРА ИССЛЕДОВАНИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

- *изготовление 2-х ТВС в России*
- *разработка и изготовление системы измерений в России и Германии*
- *проведение 2-х экспериментов на установке CORA (Германия)*
- *проведение послепусковых исследований в России*
- *подготовка базы данных CORA - ВВЭР (Германия, Россия)*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

- *проведение работ по международной стандартной проблеме (ISP-36) под эгидой OECD (11 стран, 5 кодов)*
- *разработка отечественной процедуры оценки качества кодов:*
  - *анализ неопределенностей*
  - *анализ чувствительности*
- *разработка корреляций по кинетикам растворения:*
  Zr + 1%Nb в нержав. стали
  UO_2 в Zr + 1% Nb
  B_4C в нержав. стали

ОБОБЩЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

ИНТЕГРИРОВАННЫЙ БАНК ДАННЫХ
CORA ВВЭР, PWR, BWR

ПОЛЬЗОВАТЕЛИ БАЗЫ ДАННЫХ
РАЗРАБОТЧИКИ РАСЧЕТНОГО ИНСТРУМЕНТА

Запроектные аварии

2-я фаза – бассейн расплава на днище корпуса

Событие	Определяющие факторы	Определяющие параметры	Расчетный инструмент	Комментарий
Выход расплава в нижнюю камеру смешения, образование бассейна расплава на днище корпуса реактора	• Взаимодействие расплав-вода внутри корпуса; • Стратификация бассейна расплава; • Теплогидравлика бассейна расплава; • Взаимодействие расплав-корпус; • Термомеханика поведения корпуса, тип и критерий его разрушения; • Повторная критичность.	• Композиция расплава; • Скорость и стадийность поступления расплава на днище; • $M_{расплава}=f(\tau)$, кг; • $Nu = f(Ra)$; • $Q_{на\ корпус}=f(\tau)$, кВт/м^2; • $P_I = f(\tau)$, МПа.	**Детальный анализ** CONV-2D CATHARE-ICARE RELAP-SCDAP DINCOR **Быстрая оценка** Интегральные коды MARCH-ВВЭР MELCOR MAAP-ВВЭР ESCADRE-ВВЭР + экспертная оценка	Наиболее продвинутая оценка с помощью кода CONV—2D. Уровень неопределенности даже при оценке детальными кодами достаточно высок. **Проблемы**: Нет инструмента: • для учета распределения объемного тепловыделения; • для оценки возможности парового взрыва.

ЦЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ АВАРИЕЙ: ПРЕДОТВРАТИТЬ ВЫХОД РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ ИЗ КОРПУСА РЕАКТОРА

ЦЕЛЬ ПРОЕКТА РАСПЛАВ

Разработка комплекса мер по удержанию расплава в корпусе реактора

КЛЮЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Образование бассейна расплава активной зоны в корпусе реактора.

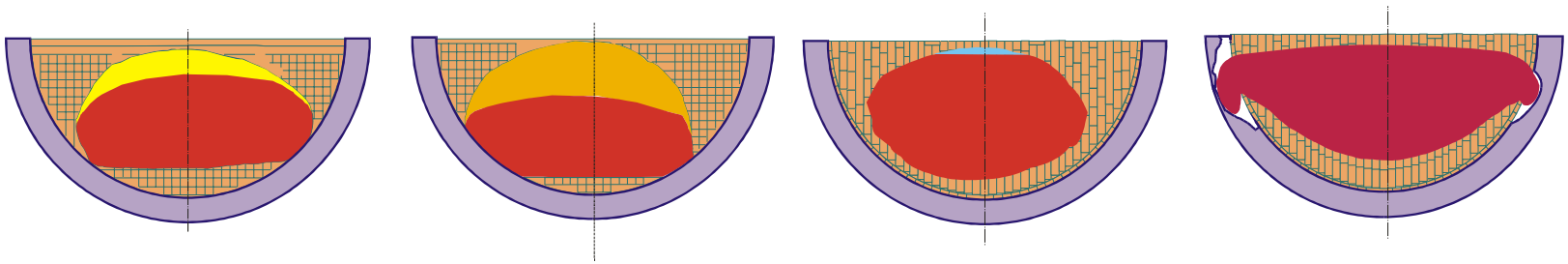
Тепловое и физико-химическое взаимодействие расплава со стенками корпуса.

РАСПЛАВ-AW-200-4: ВИД СЛИТКА

СВОЙСТВА КОРИУМА, ИЗМЕРЕННЫЕ В РАМКАХ ПРОЕКТА РАСПЛАВ

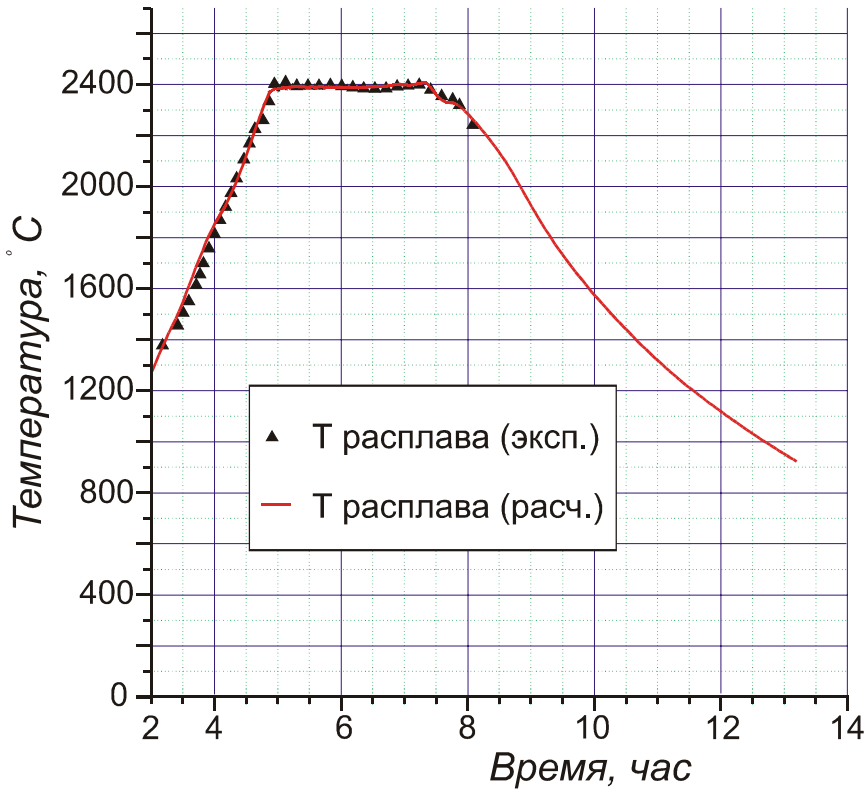
Свойство	Композиция кориума и диапазон температур			
	С–22	С–32	С–50	С–100
Температура ликвидус	2680 *К*	2680 *К*	2760 *К*	2840 *К*
Электропроводность	до 2890 *К*		до 2840 *К*	до 3070 *К*
Вязкость	до 2970 *К*			до 3070 *К*
Теплопроводность	до 3150 *К*			до 3150 *К*
Поверхностное натяжение	до 2820 *К*	до 2970 *К*		до 2970 *К*
Плотность	до 2820 *К*	до 2970 *К*		до 3370 *К*

ЭКСПЕРИМЕНТЫ РАСПЛАВ-AW-200



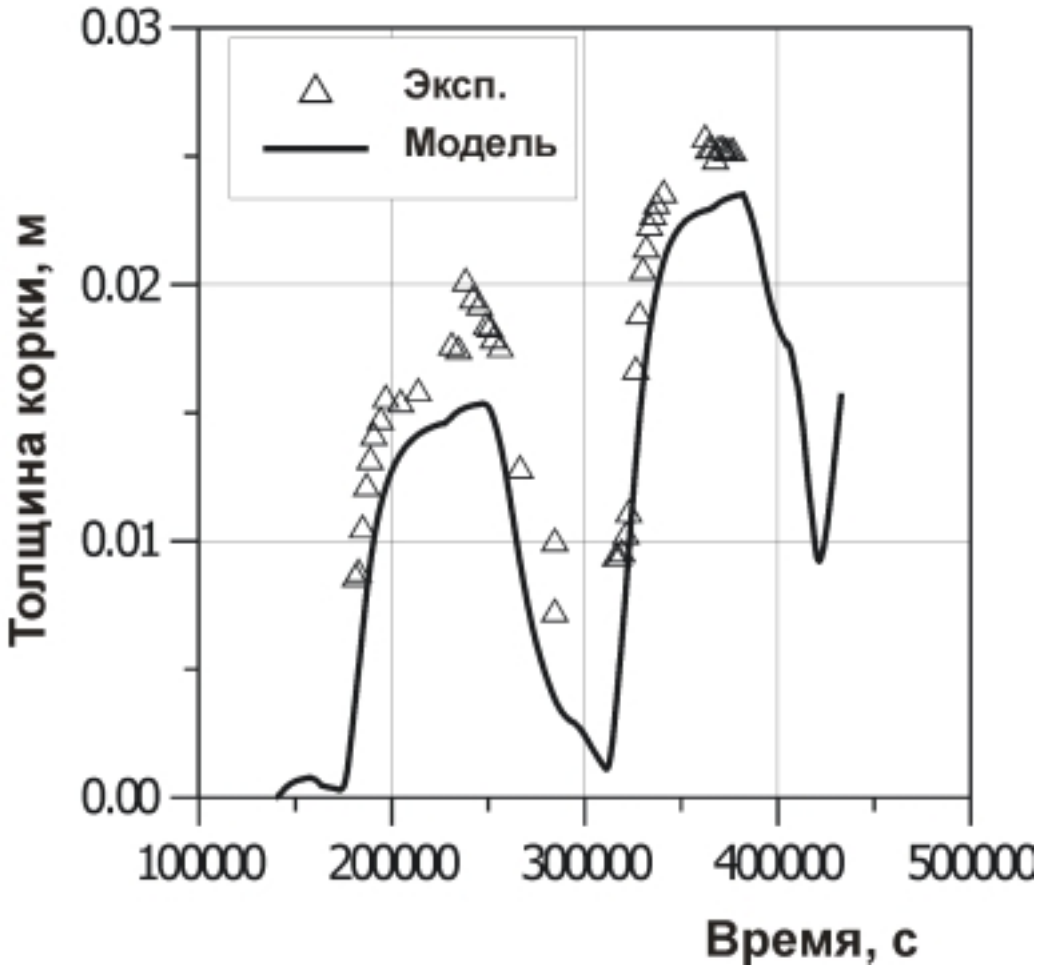
	AW-1	AW-2	AW-3	AW-4
Композиция кориума	82%UO_2+5%ZrO_2+13%Zr 0,3%C	82%UO_2+5%ZrO_2+13%Zr 0,3%C	76%UO_2+21%ZrO_2 1,2%FeO; 1,8%La_2O_3	77%UO_2+14%ZrO_2+9%Zr
Загрузка	198 кг	198 кг	195 кг	200 кг
Тепловой поток	130 кВт/м^2	280 кВт/м^2	90 кВт/м^2	180 кВт/м^2
Время выдержки на стационаре	2ч30мин	1ч10мин	1ч50мин	4часа

РАСПЛАВ-AW-200-4: СРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КОРИУМА С РАСЧЕТНОЙ

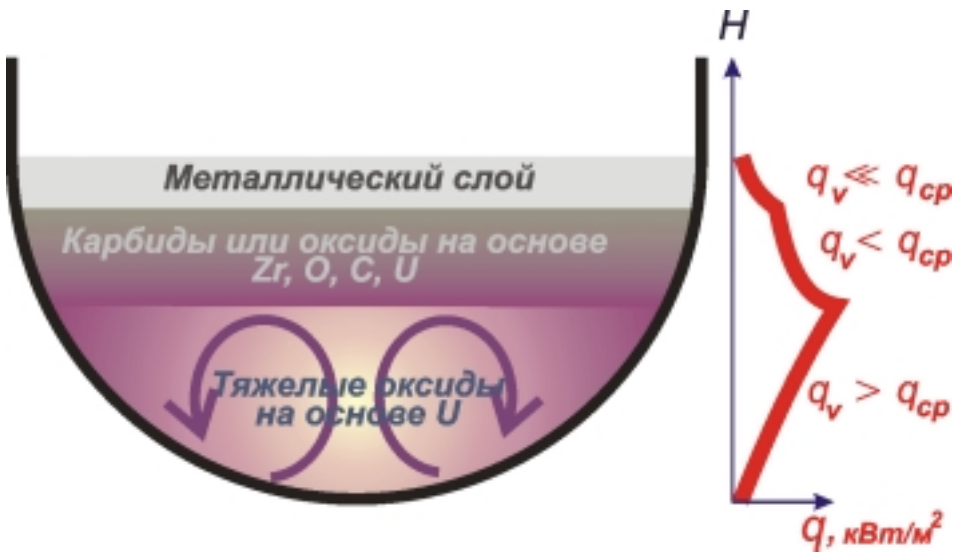


СЕДЬМАЯ СЕРИЯ СОЛЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сравнение измеренной толщины корки с расчетом



ВОЗМОЖНОЕ СОСТОЯНИЕ БАССЕЙНА РАСПЛАВА В НИЖНЕЙ ЧАСТИ КОРПУСА ВВЭР-1000 ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ



Возможные механизмы разрушения корпуса:

1. Локальный разрыв в месте максимального теплового потока из-за ползучести.
2. Отрыв нижней части корпуса («гильотинный эффект»).

ВЫВОДЫ

В рамках исследований по программе «Расплав» впервые в мировой практике:

- **Получена база данных по теплофизическим свойствам различных композиций расплава активной зоны реактора (U-Zr-O) при температурах до 3100 К.**
- **Создана верификационная база данных, описывающая ключевые параметры поведения тепловыделяющего бассейна расплава.**
- **Разработаны и верифицированы математические модели, позволяющие обосновывать процедуры управления тяжелой аварией на АЭС и необходимые системы безопасности.**

Запроектные аварии

3-я фаза – защитная оболочка

Событие	Определяющие факторы	Определяющие параметры	Расчетный инструмент	Комментарий
Образование бассейна расплава в подреакторном объеме, прямой нагрев защитной оболочки, возможность горения и детонации водорода	• Взаимодействие расплав-бетон (без ловушки); • Взаимодействие расплав – материалы ловушки; • Теплообмен (излучение, теплопроводность, естественная конвекция); • Дополнительный выход ПД, неконденсируемых газов, аэрозолей; • Взаимодействие расплав – вода (паровой взрыв?); • Выход водорода (водородный взрыв?); • Конденсация пара и осаждение ПД на конструкциях защитной оболочки; • Повторная критичность; • Обрушение конструкций защитной оболочки; • Окисление конструкций защитной оболочки; • Негерметичность защитной оболочки	• Скорость эрозии бетона; • $M_{H2,ПД,аэроз.,газ} = f(\tau)$, кг; • Концентрация водорода и CO по помещениям защитной оболочки; • Параметры состояния ловушки при ее применении; • $P_{защ.об.} \sim f(\tau)$, МПа; • Тепловые нагрузки на элементы конструкций защитной оболочки	VAPEX CORCON CONTAIN WECHL КУПОЛ PROBL ЗЕТ.СОМ	Оценка на уровне мировых стандартов **Проблемы:** • Оценка возможностей парового взрыва (механизма, приводящего к триггеру); • Высокая степень неопределен-ности при оценке; • Динамические расчеты термомеханики отклика защитной оболочки

Цель управления аварией на этапе выхода расплава активной зоны за пределы корпуса реактора в помещения защитной оболочки может быть сформулирована следующим образом:

Обеспечить локализацию

расплава материалов активной зоны реактора в случае тяжелой аварии с разрушением корпуса реактора в пределах подреакторного помещения бетонной шахты.

Требования к основным функциям, *выполнение которых должно привести к работоспособности устройства локализации расплава* – **УЛР**

- **Обеспечение достаточного объема для приема и размещения жидких и твердых компонентов материалов активной зоны и конструкционных материалов реактора;**
- **Обеспечение гарантированного охлаждения расплава, и предотвращение его выхода за установленные границы зоны локализации;**
- **Обеспечение подкритичности расплава при его длительном пребывании в зоне локализации и контроля за подкритичностью;**
- **Обеспечение минимизации выхода РПД в пространство защитной оболочки;**

Требования к основным функциям,
выполнение которых должно привести к работоспособности устройства локализации расплава – УЛР

продолжение

- **Обеспечение минимизации перемещения днища корпуса реактора при его отрыве или пластическом деформировании;**
- **Обеспечение подачи воды в бетонную шахту для охлаждения внешней поверхности корпуса устройства локализации и отвода пара из бетонной шахты;**
- **Обеспечение непревышения максимальных напряжений в конструкциях, расположенных в помещениях бетонной шахты, при тепловых воздействиях и возможных локальных динамических процессах (паровые взрывы, гидроудары).**

Основные физические процессы,
сопровождающие поступление расплава из корпуса реактора в УЛР и происходящие при длительном нахождении расплава в УЛР:

- **Перемещение расплава из корпуса реактора в УЛР;**
- **Взаимодействие расплава с жертвенными материалами в УЛР (изменение плотности композиции, температура плавления за счет взаимодействия);**
- **Теплопередача от расплава к охлаждаемым поверхностям за счет естественной конвекции тепловыделяющей жидкости;**
- **Теплоотвод (охлаждение) корпуса УЛР за счет естественной конвекции охлаждающей жидкости (воды);**
- **Теплоотвод (охлаждение) верхней поверхности расплава за счет излучения и за счет кипения воды после ее подачи на верхнюю поверхность расплава.**

КРИТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ,

которые должны быть решены в ходе НИОКР по УЛР:

- **Внутрикорпусная стадия аварии**
  (уточнение сценариев и определение исходных данных)
  - **Параметры в РУ до разрушения днища корпуса реактора;**
  - **Характер разрушения днища РУ;**
  - **Количество, состав и скорость поступления расплава активной зоны и конструкционных материалов в УЛР (исходные данные).**

- **Заполнение УЛР**
  - **Выбор жертвенного материала и его взаимодействие с кориумом;**
  - **Определение теплофизических свойств смеси;**
  - **Исследование стратификации и конфигурации слоев, обоснование инверсии (если необходимо);**
  - **Анализ теплообмена излучением;**
  - **Ударные нагрузки, гидроудары.**

КРИТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ,
которые должны быть решены в ходе НИОКР по УЛР: продолжение

3. Долговременное удержание в УЛР

- **Исследование последствий возможных динамических процессов;**
- **Теплопередача к охлаждаемой границе и к поверхности расплава (естественная конвекция);**
- **Исследование теплогидравлики и кризиса теплообмена в водоохлаждаемых конструкциях;**
- **Выход продуктов деления с учетом конфигурации слоев и наличия воды на поверхности расплава;**
- **Повторная критичность.**

УЛР – меры по обоснованию декларируемых функций безопасности

Функция	Явления	Критические вопросы	Меры/Обоснование
Прием и размещение жидких и твердых компонентов активной зоны и конструкционных материалов	Распространение расплава по крупноячеистой структуре жертвенного материала, его взаимодействие с жертвенным материалом	• Количество и скорость поступления расплава активной зоны и конструкционных материалов в УЛР; • Течение расплава и его взаимодействие с жертвенным материалом; • Возможное замерзание расплава; • Попадание крупных фрагментов	• Расчетные программы по определению количества и скорости поступления расплава в УЛР; • Расчетная программа по заполнению УЛР кориумом и тепловому взаимодействию расплава с жертвенным материалом; • Выбор жертвенного материала; • Конструкционные элементы (опора корпуса, диаметр воронки)
Передача тепла от кориума к охлаждающей воде	Процессы естественной циркуляции расплава в УЛР	• Теплопередача к охлаждаемой границе; • Пассивная подача охлаждаемой воды и ее кипение на внешней поверхности стального корпуса УЛР	• Расчетные программы и/или корреляции по теплопередаче к охлаждаемой границе; • Обоснование охлаждения в секции УЛР, в том числе, пассивная подача воды, отвод пара и т.д.

УЛР – меры по обоснованию декларируемых функций безопасности (продолжение)

Функция	Явления	Критические вопросы	Меры/Обоснование
Обеспечение минимизации перемещения днища корпуса реактора с кориумом при его отрыве или пластическом деформировании	Нагрев, деформации и разрушение днища корпуса реактора с учетом состояния РУ и кориума	• Давление в РУ; • Масса и состав кориума; • Характер разрушения днища корпуса	• Расчетные программы по определению параметров в РУ; • Расчетные программы по разрушению днища корпуса с учетом ВКУ; • Свойства материалов
Защита несущих строительных конструкций от разрушения за счет лучистого теплообмена	Нагрев, разрушение строительных конструкций	• Теплопередача излучением; • Отклик строительных конструкций	• Тепловая защита несущих конструкций; • Расчетное обоснование
Предотвращение выхода расплава за установленные проектом границы его локализации	Разрушение охлаждаемых стенок УЛР от ударных нагрузок, разрушение неохлаждаемой части конструкции УЛР вследствие излучения	• Состав и скорость поступления кориума в УЛР; • Проходные сечения в жертвенном материале; • Максимально допустимое время для подачи воды на поверхности расплава	• Расчетные программы по определению количества и скорости поступления расплава в УЛР; • Расчетная программа по заполнению УЛР кориумом и тепловому взаимодействию расплава с жертвенным материалом

УЛР – меры по обоснованию декларируемых функций безопасности (продолжение)

Функция	Явления	Критические вопросы	Меры/Обоснование
Подкритичность кориума в бетонной шахте	Неуправляемые ядерные реакции в кориуме	• Состав и масса расплава активной зоны в УЛР; • Выбор состава жертвенного материала; • Время подачи воды	• Расчетные программы по определению количества и скорости поступления расплава в УЛР; • Программа расчета критичности
Подача воды в бетонную шахту (на поверхность расплава) и отвод пара из бетонной шахты	Кипение на поверхности. Горение, переход горения в детонацию в случае отсутствия инверсии слоев расплава при генерации водорода в результате взаимодействия металл – вода	• Обеспечение инверсии слоев расплава; • Выбор жертвенного материала;	• Расчетная программа по заполнению УЛР кориумом и тепловому взаимодействию расплава с жертвенным материалом;

УЛР – меры по обоснованию декларируемых функций безопасности (продолжение)

Функция	Явления	Критические вопросы	Меры/Обоснование
Предотвращение значительного выхода радиоактивных веществ в пространство защитной оболочки	Выход продуктов деления из жидкой фазы. Осаждение продуктов деления в слоях воды	• Снижение температуры расплава; • Подача воды на поверхность расплава	• Расчетная программа по заполнению УЛР кориумом и тепловому взаимодействию расплава с жертвенным материалом; • Экспериментальные исследования выхода ПД; • Расчетные программы по осаждению ПД
Снижение максимальных напряжений в конструкциях, расположенных в подреакторном помещении бетонной шахты при возможных локальных паровых взрывах и гидроударах до приемлемого уровня	Термические напряжения. Разрушение бетонных конструкций. Гидроудары. Паровые взрывы	• Время подачи воды на поверхность расплава; • Защита стального корпуса от ударных воздействий; • Недопущение паровых взрывов и/или минимизация их последствий	• Расчетная программа по заполнению УЛР кориумом и тепловому взаимодействию расплава с жертвенным материалом; • Конструкция УЛР; • Экспериментальные исследования возможности паровых взрывов

УЛР – меры по обоснованию декларируемых функций безопасности (продолжение)

Функция	Явления	Критические вопросы	Меры/Обоснование
Обеспечение выполнения функции УЛР без вмешательства оператора или с минимальным управляющим воздействием со стороны оперативного персонала		• Обоснование работоспособности без взаимодействия оператора	• Весь комплекс работ

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

БАЗЫ ДАННЫХ

ЭКСПЕРИМЕНТЫ В РОССИИ
в т.ч. при участии западных партнеров

- *ГОРЕНИЕ - детонация водорода*
- *РАСПЛАВ*
- *физические свойства расплава АЗ*
- *механич. свойства оболочки твэлов ВВЭР*
- *аварии с возрастанием реактивности (АВР)*
- *взаимодействие расплав - бетон*
- *аварии с потерей теплоносителя (АПТ)*

ЭКСПЕРИМЕНТЫ на ЗАПАДНЫХ УСТАНОВКАХ
совместно с Россией

- *аварии с потерей теплоносителя (АПТ) деградация АЗ: CORA (Германия)*
- *взаимодействие расплав - бетон: BETA (Германия), ACE (США)*
- *распространение водорода в защитной оболочке: HDR (Германия)*
- *эффективность фильтрации при сбросе давления из защитной оболочки: ACE (США), ТАЙФУН (Германия)*

БАНКИ ЗНАНИЙ,
полученные в рамках международной кооперации (банки данных, коды)

- *теплогидравлика — CAMP, ICAP - США PWG-2 - OECD ISP*
- *тяжелые аварии — CSARP - США PWG-2,4 - OECD ISP*

РАСЧЕТНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

- *верификация и адаптация имеющегося*
- *разработка нового и его верификация*

ПРИМЕНЕНИЕ - РЕАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ

Проект СКАТ

Цель работы: ***Разработка современных программ для анализа тяжелых аварий на АЭС***

- Разработка современных компьютерных технологий (параллельные вычисления, подготовка и обработка информации)
- Отбор и разработка современных физических моделей
- Анализ существующих экспериментов и подготовка базы данных для валидации кодов и аттестации программ
- Применение кодов (в том числе и зарубежных) для анализа безопасности АЭС, перекрестная верификация

Проект КИТ

Цель работы: ***Разработка быстрого инженерного кода класса MELCOR для анализа тяжелых аварий на АЭС***

- Современные компьютерные технологии
- Модели инженерного уровня
- Применение для анализа безопасности АЭС

Разработка программ и оценка источников водорода

Цель работы:

- ***Разработка кода улучшенной оценки для анализа внутрикорпусной стадии развития тяжелых аварий на АЭС с ВВЭР (проект 428)***
- ***Проведение поддерживающих и сравнительных расчетов по зарубежным программам***

Содержание работы - разработка объединенного кода

- Теплогидравлика - РАТЕГ (ВНИИЭФ)
- Ранняя стадия аварии - разрушение АЗ и генерация водорода - СВЕЧА (ИБРАЭ)
- Поздняя стадия аварии - образование расплава в АЗ и на днище корпуса - ДИНКОР (ФЭИ)
- Разрушение днища корпуса реактора