

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук



Цифровые инструменты разработки и обоснования безопасности атомной техники

Академик
Л.А. Большов,
научный руководитель ИБРАЭ РАН

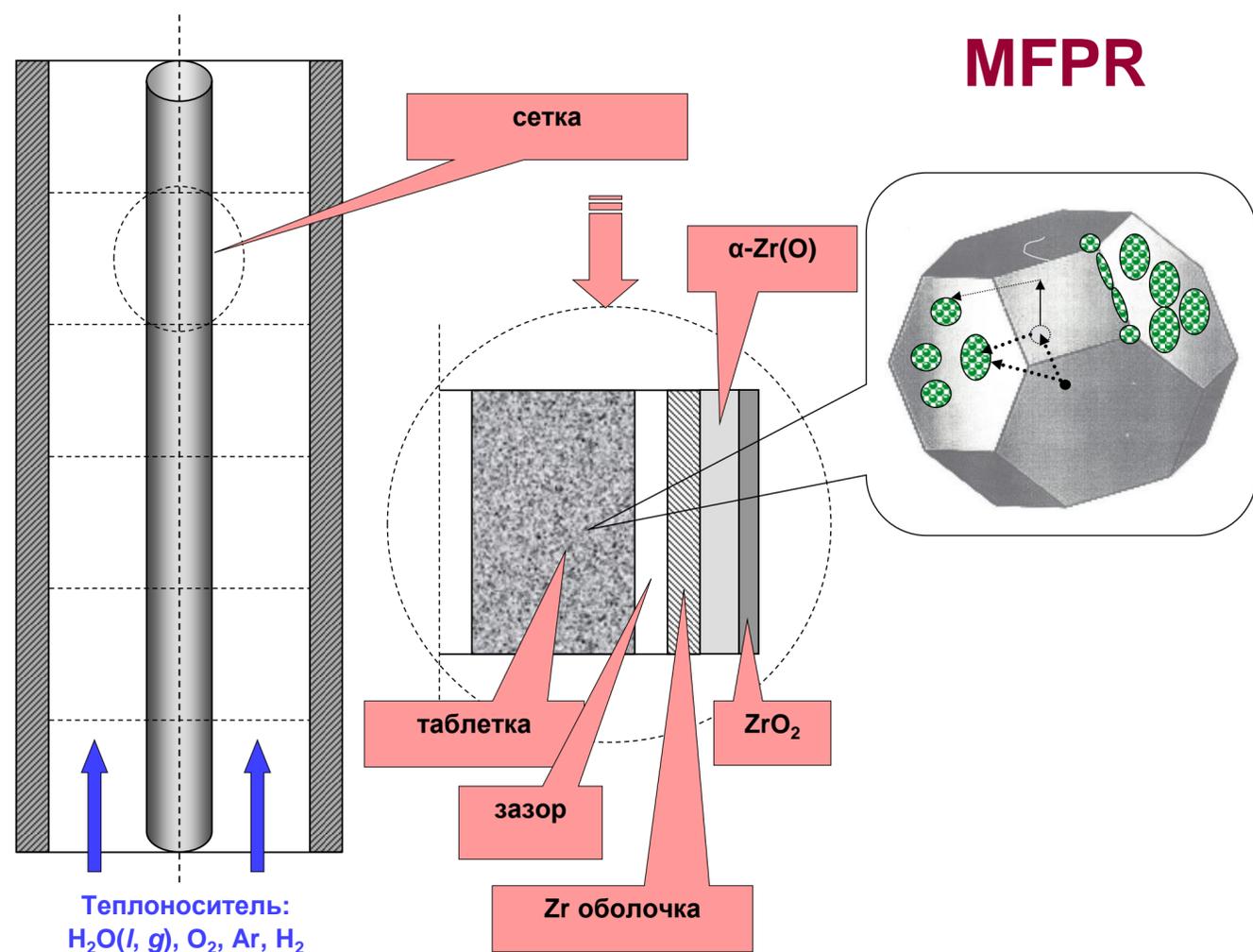
Разработка и Безопасность реакторов типа ВВЭР

- Разработка, верификация и валидация отдельных моделей и блоков (термогидравлика (1D-3D), поведение топлива, нейтроника, поведение аэрозолей, и т.д.).
- Разработка и верификация мультифизического интегрального теплоаварийного кода СОКРАТ.
- Разработка, верификация и валидация системы высокоточных кодов в составе ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР».

Разработка и Безопасность быстрых реакторов

- Разработка, верификация и валидация отдельных моделей и расчётных кодов для моделирования АЭС с РУ БР и объектов ЗЯТЦ.
- Разработка, верификация и валидация мультифизических интегральных кодов ЕВКЛИД (АЭС с РУ со свинцовым и натриевым теплоносителем) и СОКРАТ-БН (АЭС с РУ с натриевым теплоносителем).
- Разработка модели первого контура в составе интегральной расчётной математической модели ОДЭК.

Целью разработки являлось механистическое моделирование поведения топливных элементов в нормальных, переходных и аварийных режимах



СВЕЧА

СВЕЧА

- Механистическое моделирование термомеханических и физико-химических процессов нормальных и аварийных условиях.
- Сотрудничество с IRSN (France), FZK (Germany), JRC/IE, US NRC.

MFPR

- Механистический код для моделирования поведения продуктов деления в облученном UO_2 топливе в режимах нормальной эксплуатации и аварийных условиях, высокое выгорание.
- Сотрудничество с IRSN (France).

Моделирование – основной инструмент обоснования безопасности и оценки последствий тяжелых аварий



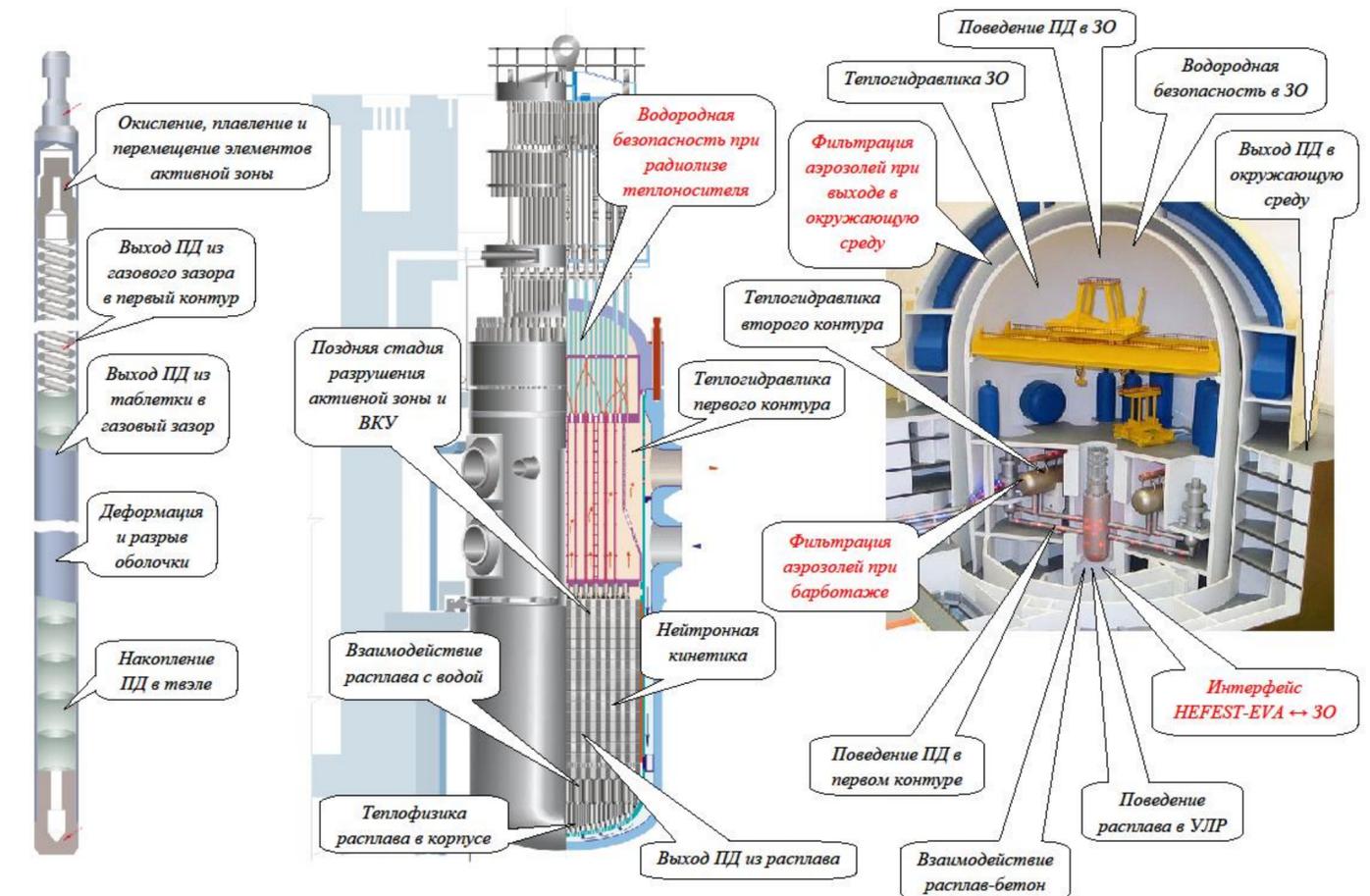
Российский код СОКРАТ – один из лучших в мире тяжелоаварийных кодов для АЭС с ВВЭР

Расчетный код СОКРАТ, коды АНГАР, КУПОЛ:

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 исходных данных для расчёта радиационных последствий (ВАБ-2)



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

Совершенствование ПС в области ТА – международная кооперация



- Доступ к первичным экспериментальным данным
- Сопоставление с аналогами
- Освоение и внедрение новых методов анализа (погрешности, неопределенности)
- Учет опыта экспертизы зарубежных проектов АЭС (Ханхикиви, Аккую, Пакш, Эль Дабба, ...)

Проекты	Организаторы
EVAN, ПАРАМЕТР-SF(1-4)	МНТЦ
ICSP MASLWR	МАГАТЭ
PKL4	ОЭСР/АЯЭ - Германия
ATLAS	ОЭСР/АЯЭ - Ю. Корея
FUMAC	МАГАТЭ
ACTOF	МАГАТЭ
ATMI-2	ОЭСР/АЯЭ (WGAMA)
BSAF, BSAF-2	ОЭСР/АЯЭ - Япония
ARC-F	ОЭСР/АЯЭ - Япония

Процессы в защитной оболочке и экспериментальные стенды

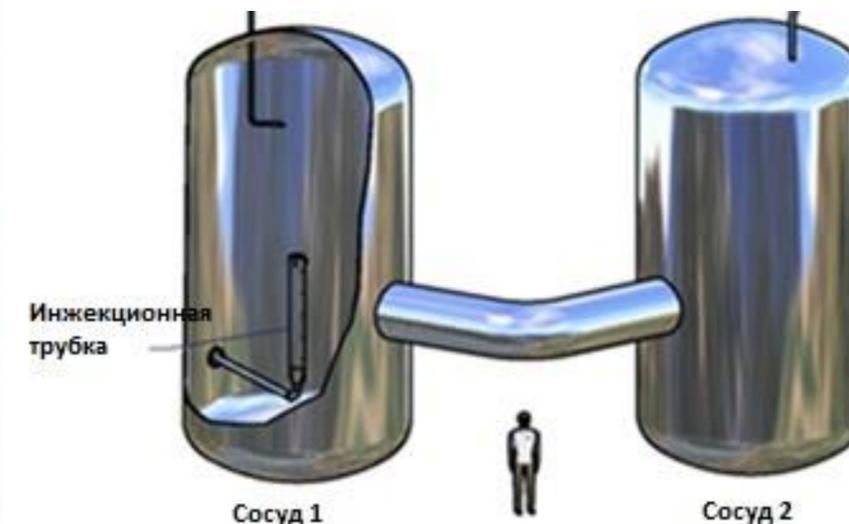


Перемешивание/стратификация.

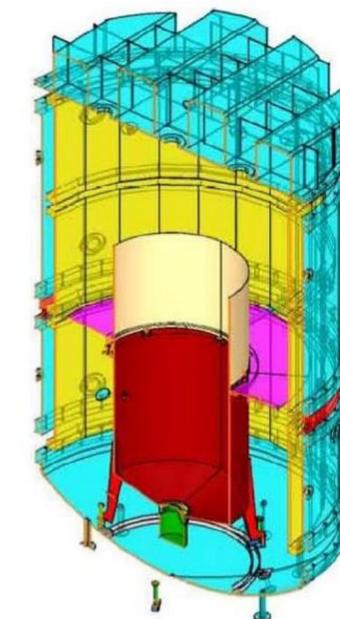
Естественная и вынужденная конвекция, вызванная:

- источниками массы (инжекция пара/водорода);
- источниками тепла:
 - выделение тепла работающего рекомбинатора;
- стоками тепла:
 - конденсация пара на стенках ЗО;
 - работа теплообменника-конденсатора;
- работой спринклерной системы.

Влияние теплопереноса излучением.



*Экспериментальная установка PANDA (PSI, Швейцария)
Объем 2-х сосудов 183,3 м³*



*Экспериментальная установка MISTRA (CEA, Франция)
Объем сосуда 97,6 м³*

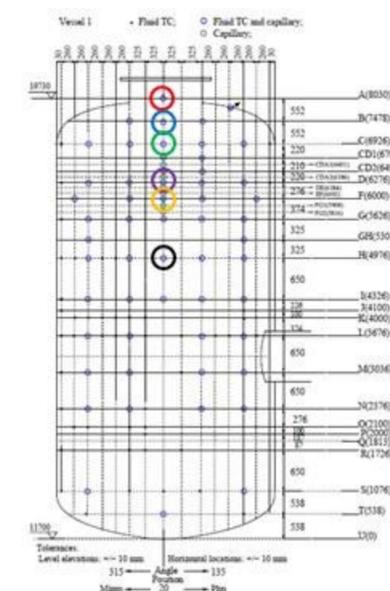
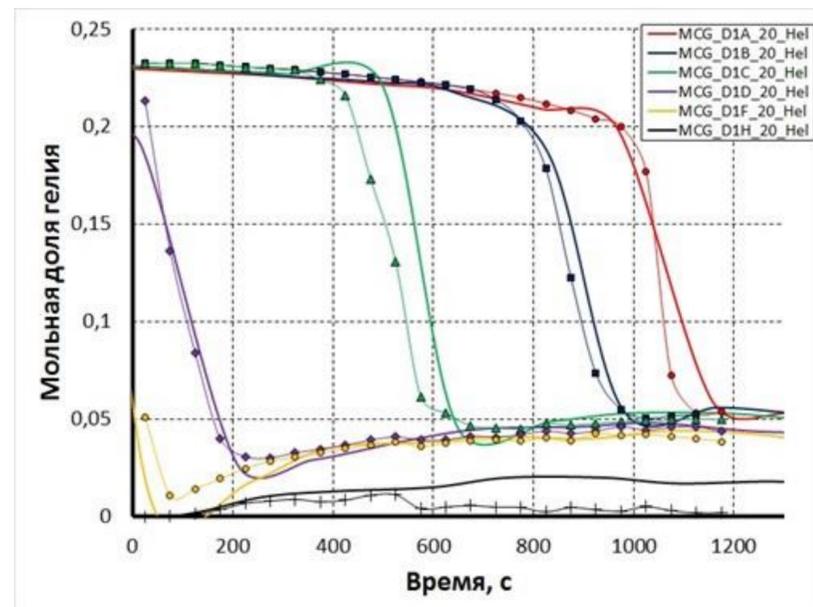
Перспективная разработка – беспараметрическое моделирование задач водородной безопасности на основе схемы КАБАРЕ

КАБАРЕ – вихреразрешающий метод с неявным моделированием подсеточных масштабов турбулентности.

Позволяет проводить расчеты на сетках с неполным разрешением масштабов турбулентности без введения дополнительных настроечных параметров.

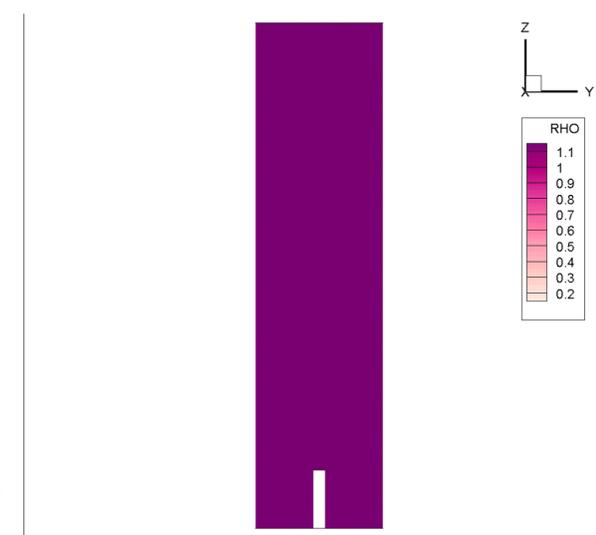
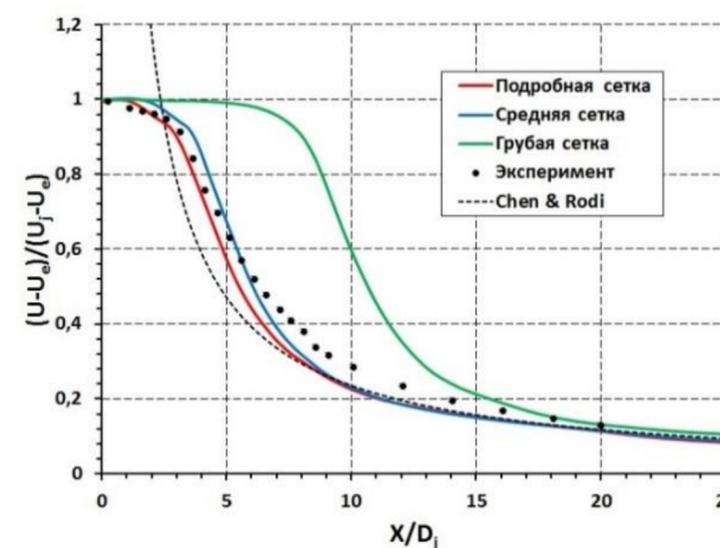
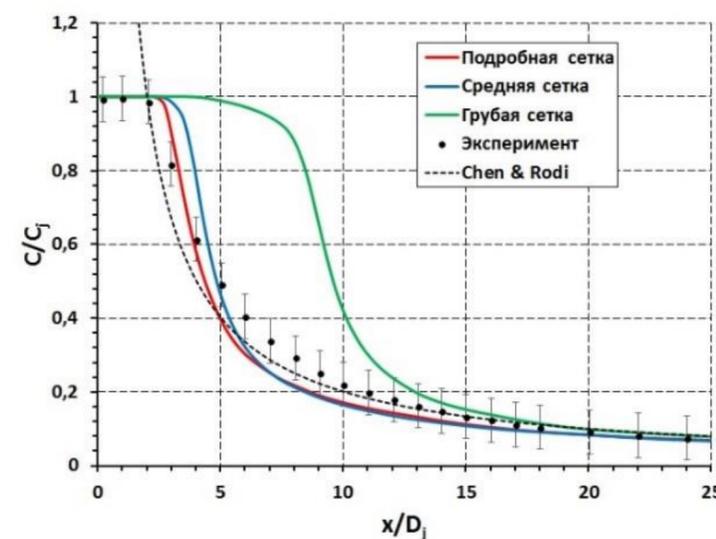
Сеточная модель является единственным источником неопределенностей, критерий выбора которой основан на анализе сходимости решения.

Разработка методики для квази- прямого численного моделирования задач ВБ без использования «подгоночных» параметров и полуэмпирических моделей



- 226 термопар для измерения температуры (макс. погрешность измерений 1.16 °C).
- 58 капилляров для измерения концентраций (макс. погрешность измерений 1,2%).
- Velocimetry Image Particle (PIV) для измерения скорости в выбранных областях (погрешность <2%).

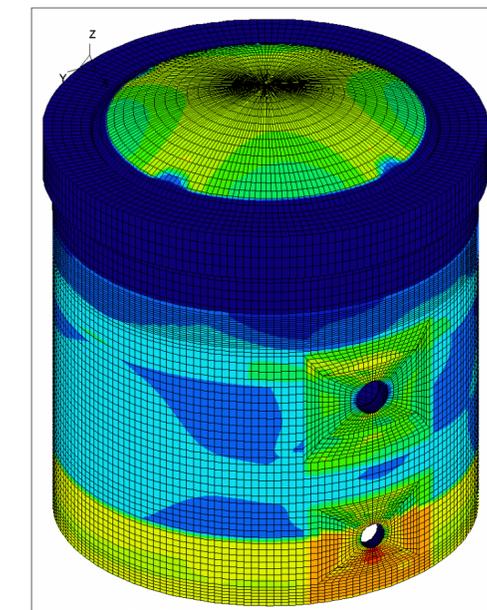
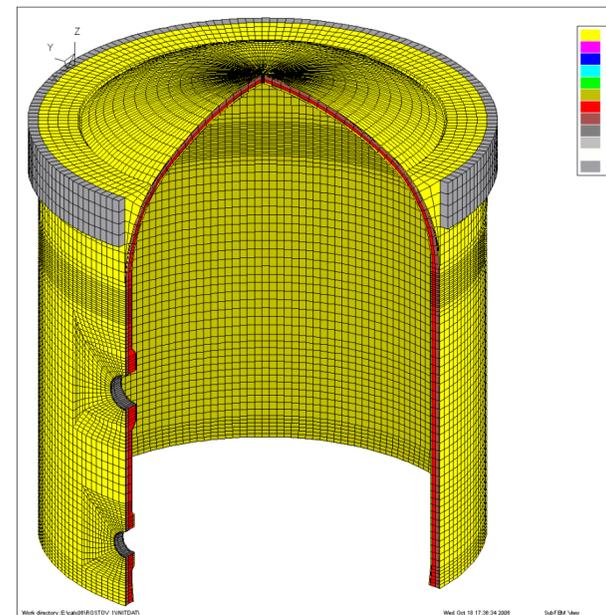
Моделирование размыва стратификации легкого газа струей горячего пара (HYMERES-2, H2P1_0)



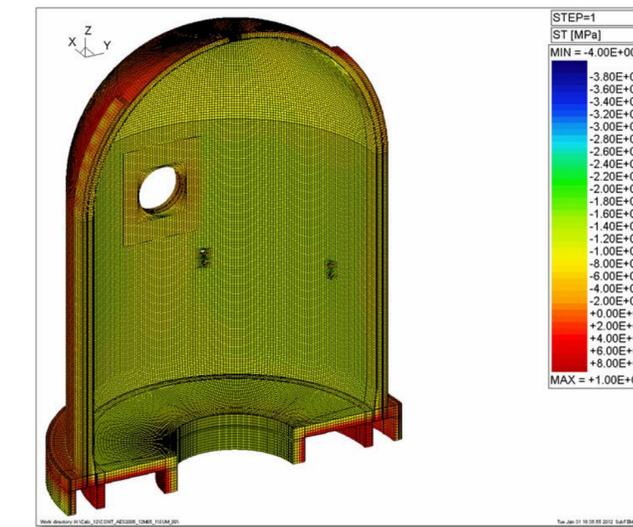
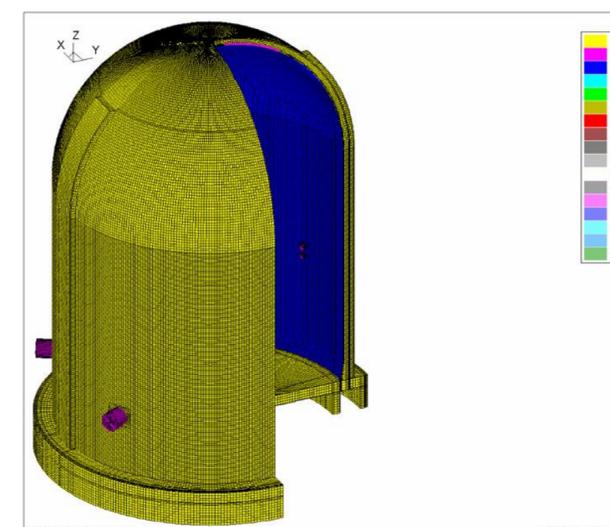
Инжекция струи гелия в спутный поток воздуха (эксперимент из базы данных ERCOFTAC)

Преднапряженная защитная оболочек АЭС с ВВЭР

- Расчетный код CONT для численного моделирования напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС при статических эксплуатационных и аварийных нагрузках.
- Анализ железобетонных оболочек без предварительного напряжения, преднапряженных железобетонных оболочек, стальных оболочек.
- Линейно-упругие, нелинейные упруго-пластические расчеты, а также расчеты с учетом растрескивания железобетона для различных статических эксплуатационных и аварийных нагрузок, в том числе и температурных.

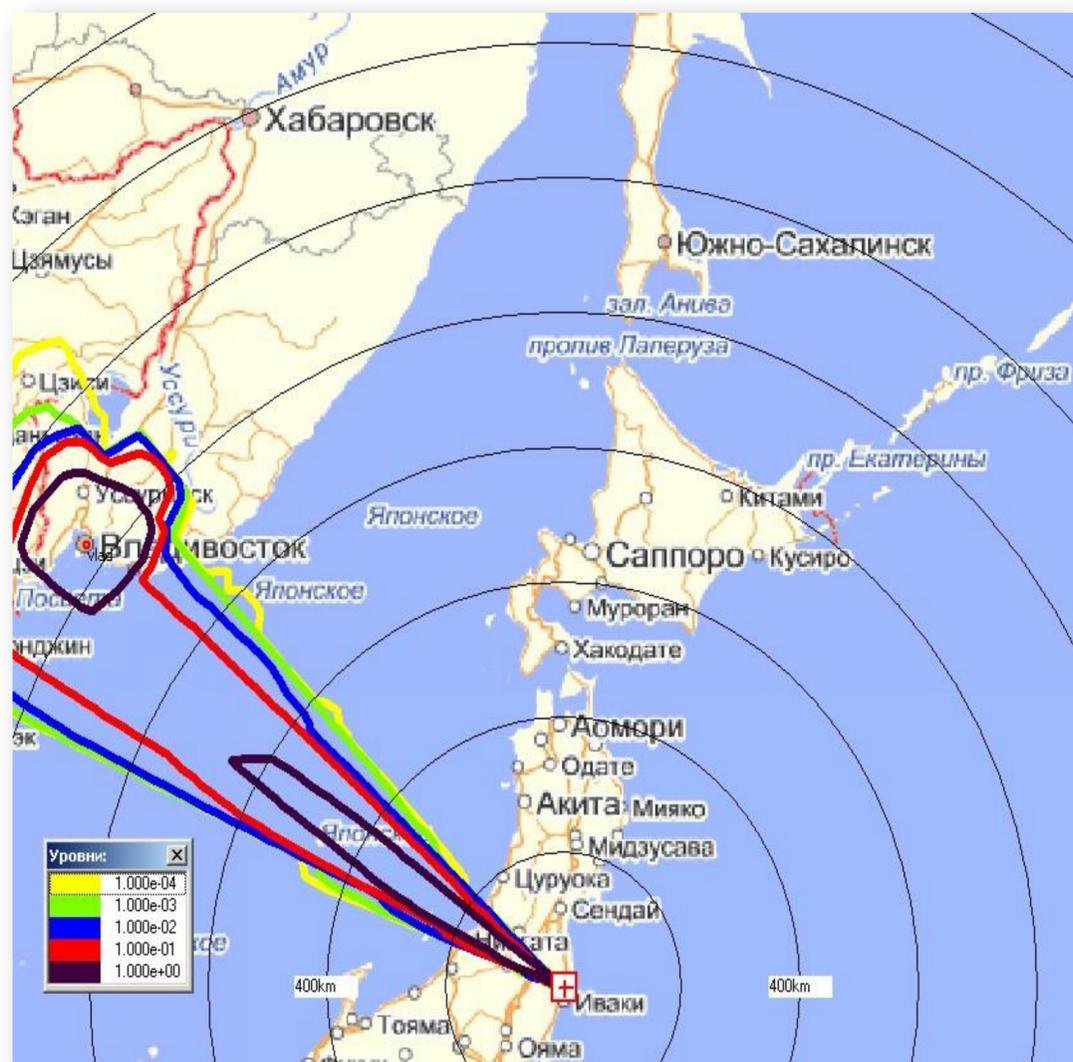


Трехмерная модель защитной оболочки
1-го блока Волгодонской АЭС

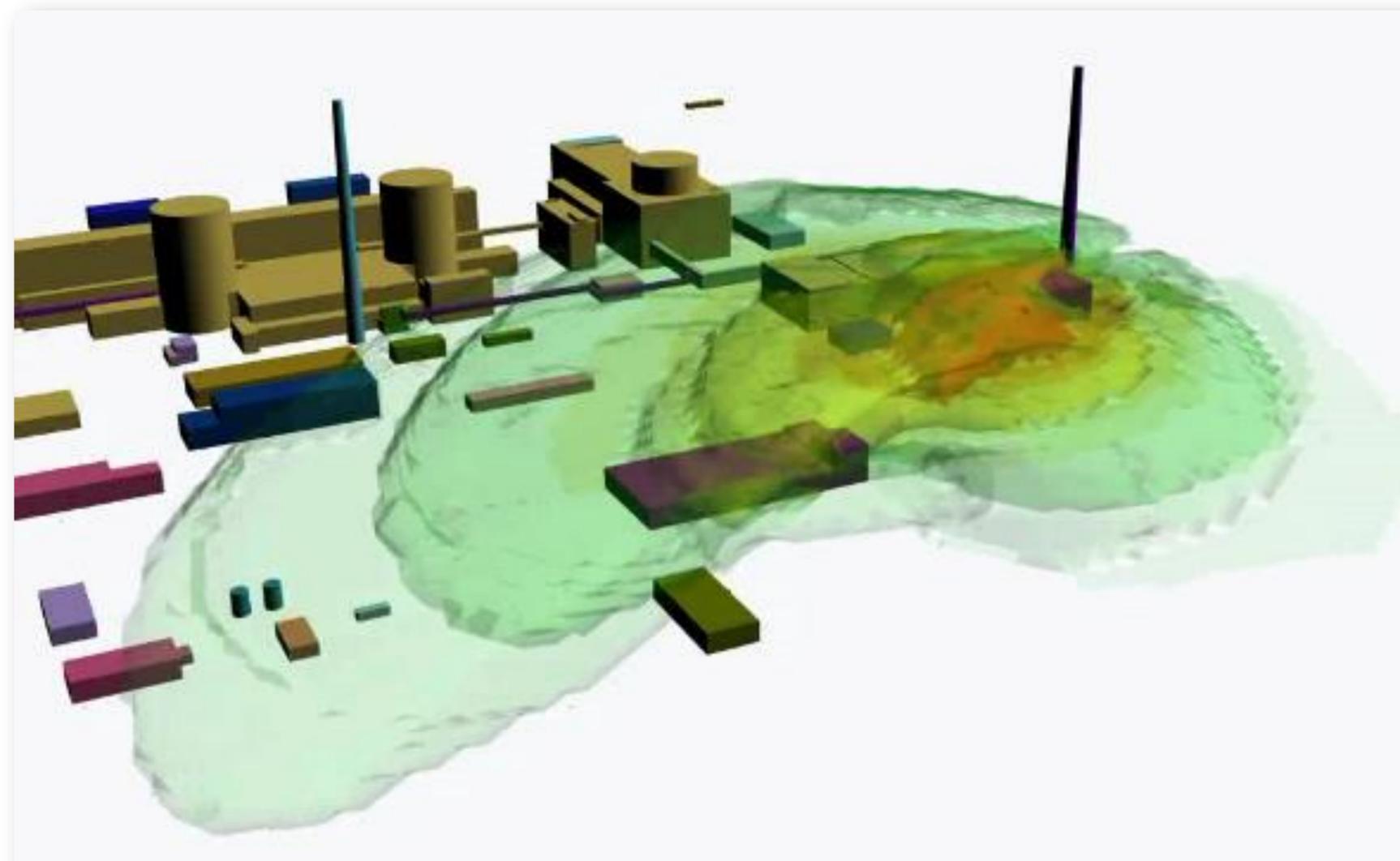


Модель защитной оболочки АЭС-2006

Распространение загрязнения в ближней и дальней зонах



Наихудший сценарий развития аварии на АЭС Фукусима 1 (ПС «Нострадамус»)



- **Трехмерное моделирование процессов на промплощадке с учетом реальной геометрии объектов.**
- **Использование суперкомпьютеров и технологий параллельных вычислений.**

Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»



Компактная Супер-ЭВМ

Виртуальная АЭС с ВВЭР – совокупность унифицированных расчётных кодов, интегрированных в общей среде, обеспечивающая согласованный расчёт многообразных физических процессов и явлений, и система исходных данных для описания поведения АЭС в проектных и аварийных режимах работы.

Разработка интегрированной системы расчётных кодов, объединяющей в себе преимущества тренажёрных (высокая скорость счёта) и исследовательских (точность) комплексов.

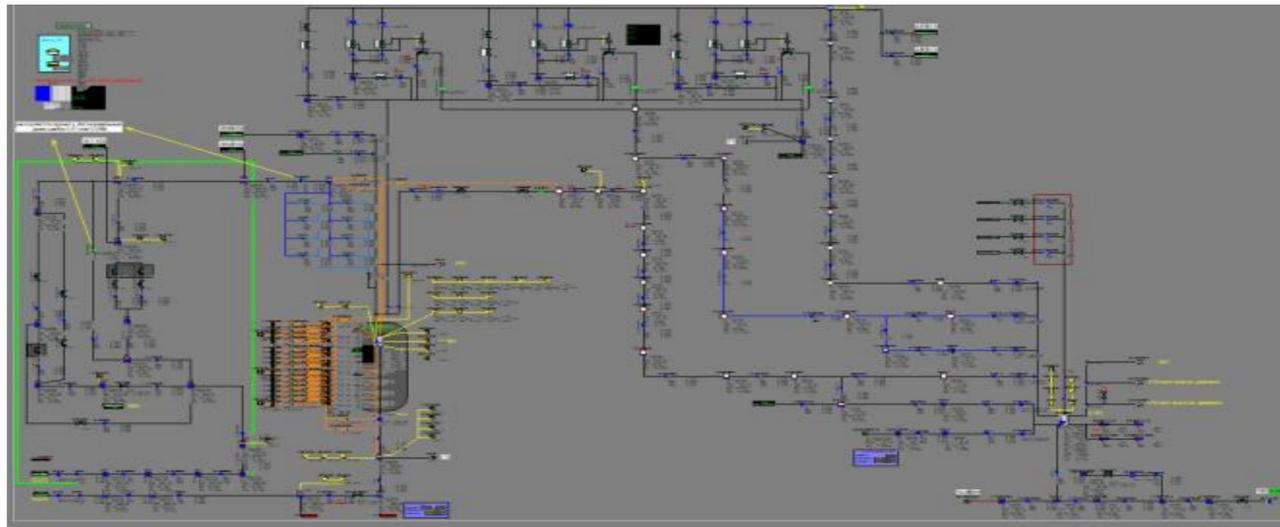


Отображение результатов



Управление моделью

Математическая модель



Теплогидравлика, нейтронная физика, электротехнический код, АСУ-ТП (порядка 300 моделируемых систем, включающих в себя около 3,5 млн переменных).



Команда проекта
ВНИИАЭС – ИБРАЭ

Анализ проектов АСУ ТП

- Независимая валидация проекта.
- Мультифизический анализ динамического процесса.

Модернизация

- Оборудование.
- Регламент эксплуатации.

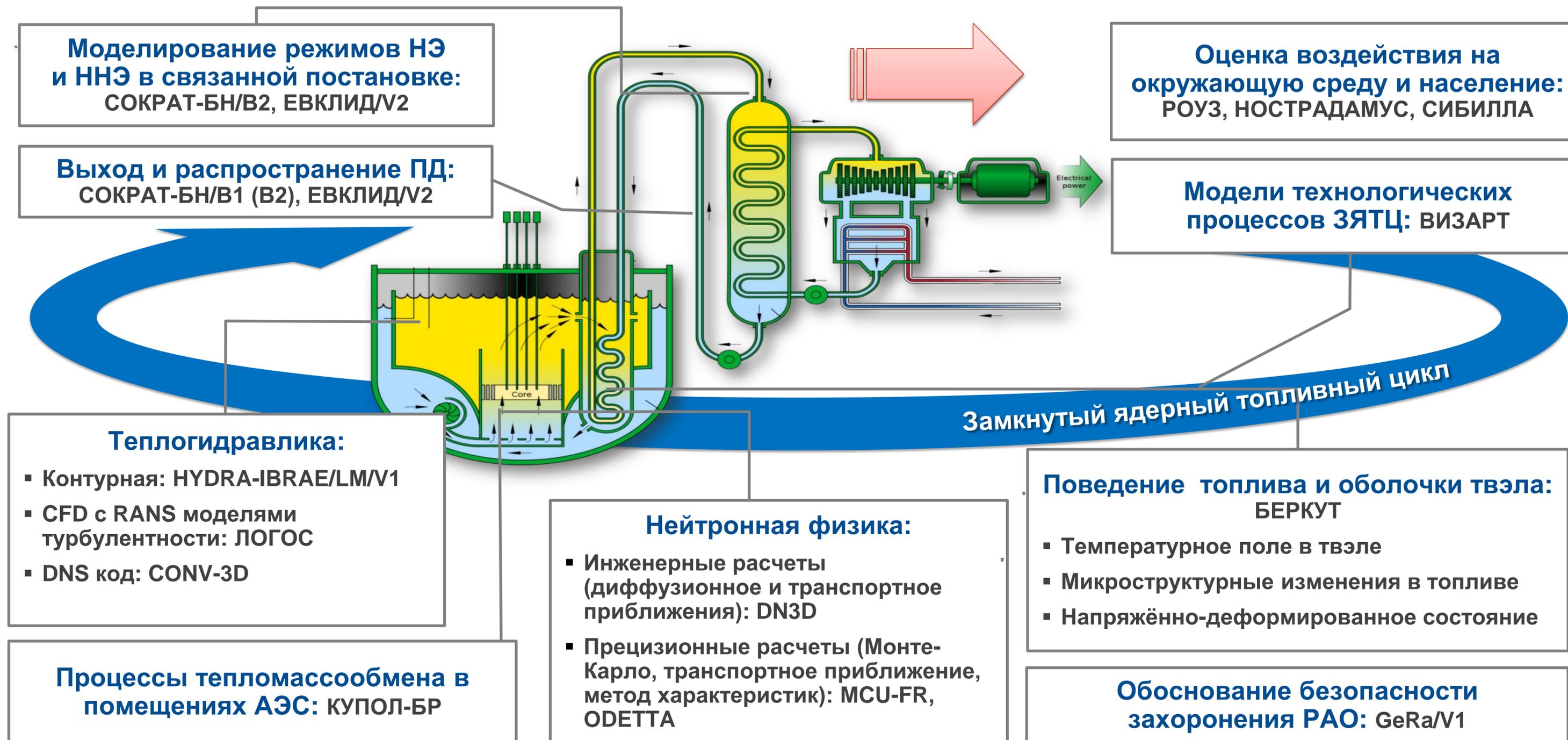
Разработка обучающих материалов

- Сценарии противоаварийных тренировок.
- Подготовка материалов для обучения физическим основам протекания тяжелой аварии.

Анализ различных событий на АЭС

Разработка и валидация РУЗА и РУТА

Безопасность быстрых реакторов (Проектное направление «ПРОРЫВ»)



Примеры разработки: коды БЕРКУТ и CONV3D

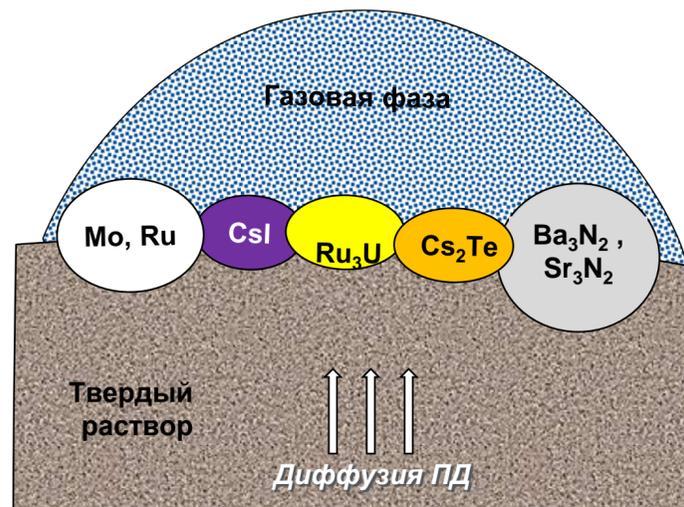


БЕРКУТ - расчетный инструмент для моделирования поведения и обоснования работоспособности тепловыделяющих элементов с различными видами топлива (оксидного, нитридного) для активных зон реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (натрий, свинец).

CONV-3D - CFD код на базе DNS приближения, ориентированный на суперкомпьютерные вычислительные ЭВМ, предназначен для проведения теплогидродинамических расчетов различных типов однофазного теплоносителя (вода натрий, свинец, свинец-висмут).

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ

Cs I Mo Ru Rh Pd Tc Ba Sr Zr
La Ce Nd Eu Nb Sb Te Xe



Транспорт ПД в зерне:

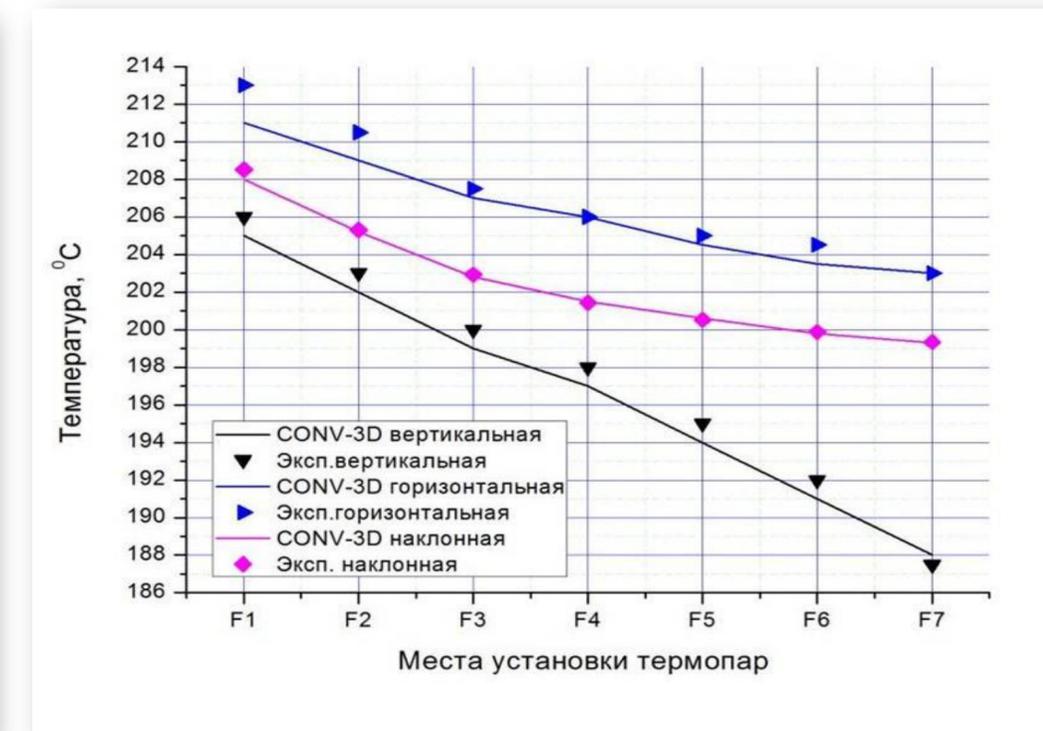
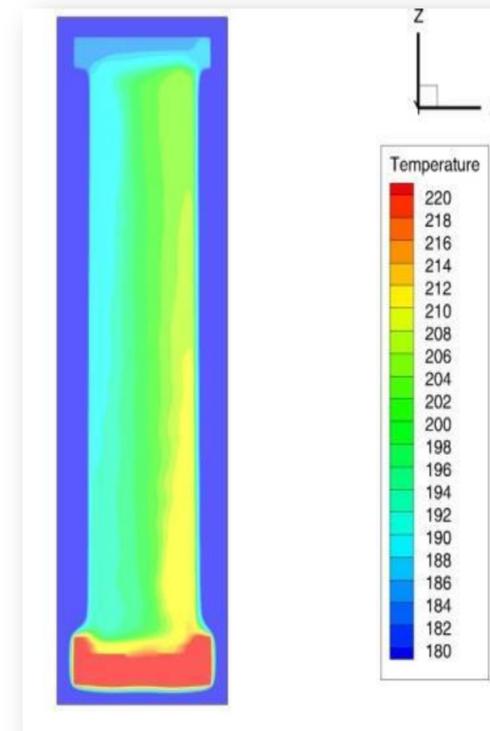
Диффузия в атомарной форме.

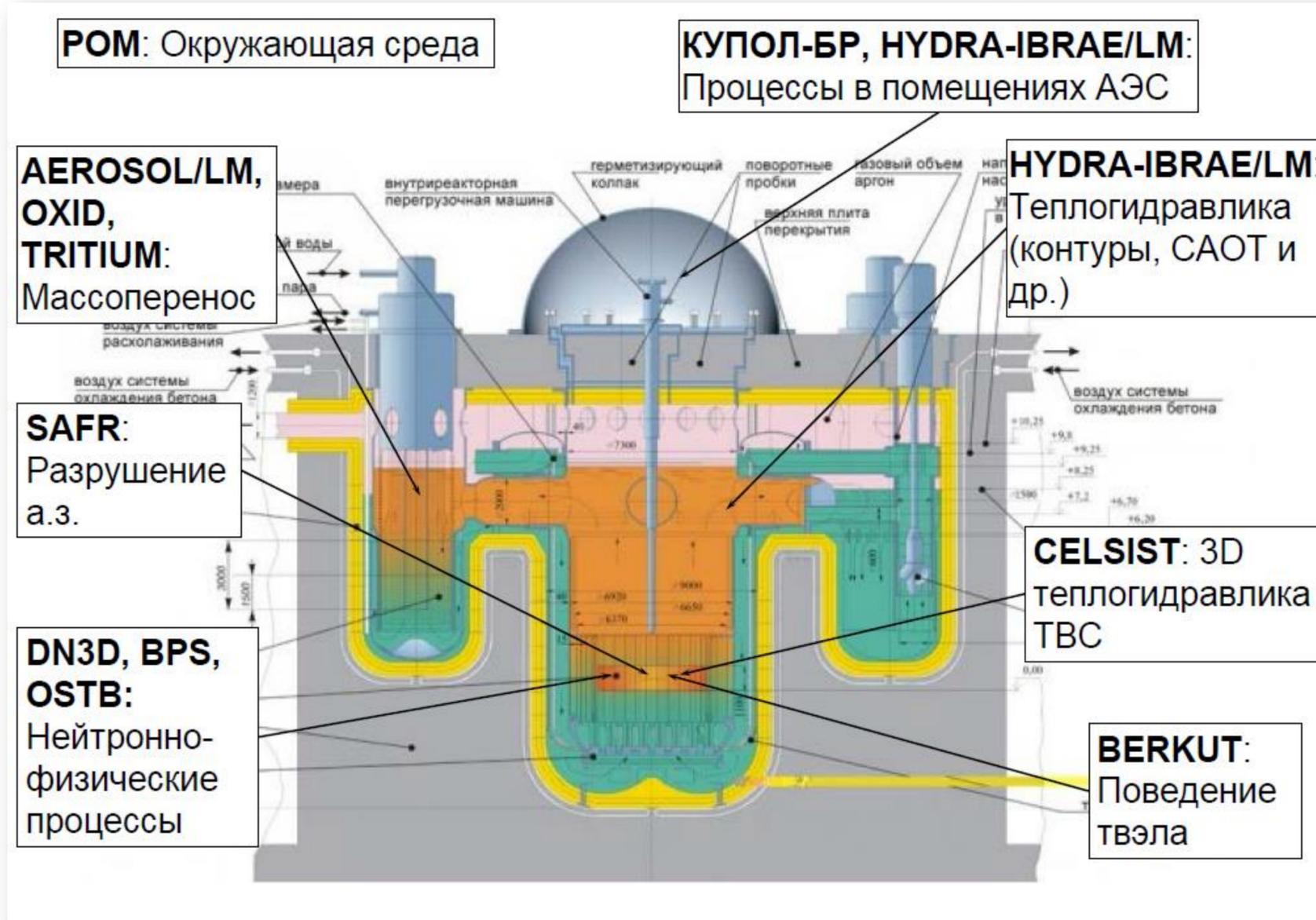
Граничные условия:

Термохимическое равновесие между разными фазами на границе зерна.

Выход ПД:

испарение в межзеренные пузыри, формирование преципитатов, транспорт в открытую пористость при условии локального равновесия.





Назначение кода:

расчетное моделирование режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации, включая аварии, в том числе, тяжелые

Дополнительные модули:

- модуль расчета переноса и поведения продуктов деления, коррозии и активации в первом контуре и газовой системе РУ БР (AEROSOL/LM)
- модуль миграции трития (TRITIUM) модуль транспорта твердофазных примесей в первом контуре РУ с ТЖМТ (OXID)
- механистические модели поведения топлива, модели для расчета источника ПД
- модуль расчета разрушения твэлов и активной зоны SAFR
- модуль расчета распространения ПД в окружающей среде POM
- 3D ячейковый модуль CELSIST

Код РОМ: использование для обоснования безопасности АЭС с РУ БРЕСТ-ОД-300

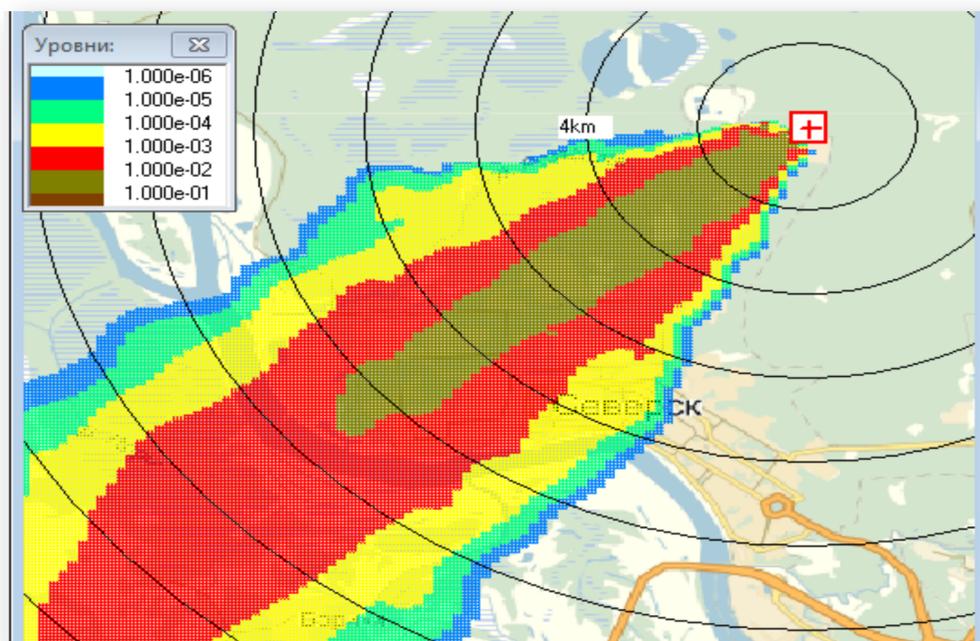


Назначение: расчет параметров радиационной обстановки (объемная плотность активности, плотность выпадений, мощность дозы, доза облучения) при выбросах радиоактивных веществ в аэрозольной и газовой форме в атмосферу.

Год подачи на аттестацию: 2015 г.

Текущее состояние разработки: аттестован в ФБУ «НТЦ ЯРБ»

Использование: в 2016 г. выполнены предварительные расчеты по определению предельно допустимого выброса для АЭС с РУ БРЕСТ-ОД-300 и проведен анализ радиационной обстановки для ряда аварийных сценариев



Карта дозы внешнего облучения от облака (мЗв) при аварийном выбросе для сценария «Разгерметизация труб ПГ с отказом отсечной и сбросной арматуры» на АЭС с РУ БРЕСТ-ОД-300

Сценарий: Разгерметизация труб ПГ с отказом отсечной и сбросной арматуры (50 т.).

Выброс в атмосферу: ^{137}Cs - $6 \cdot 10^{10}$ Бк, ^{131}I - $5.5 \cdot 10^{10}$ Бк, ^{133}Xe - $1.2 \cdot 10^{13}$ Бк, ^{135}Xe - $6 \cdot 10^{12}$ Бк

Результаты моделирования:

- Доза облучения за границей промплощадки за 10 суток не превысит 0,2 мЗв.
- Необходимости принятия срочных мер по защите населения нет.

Код РОУЗ: использование для обоснования безопасности АЭС с РУ БРЕСТ-ОД-300

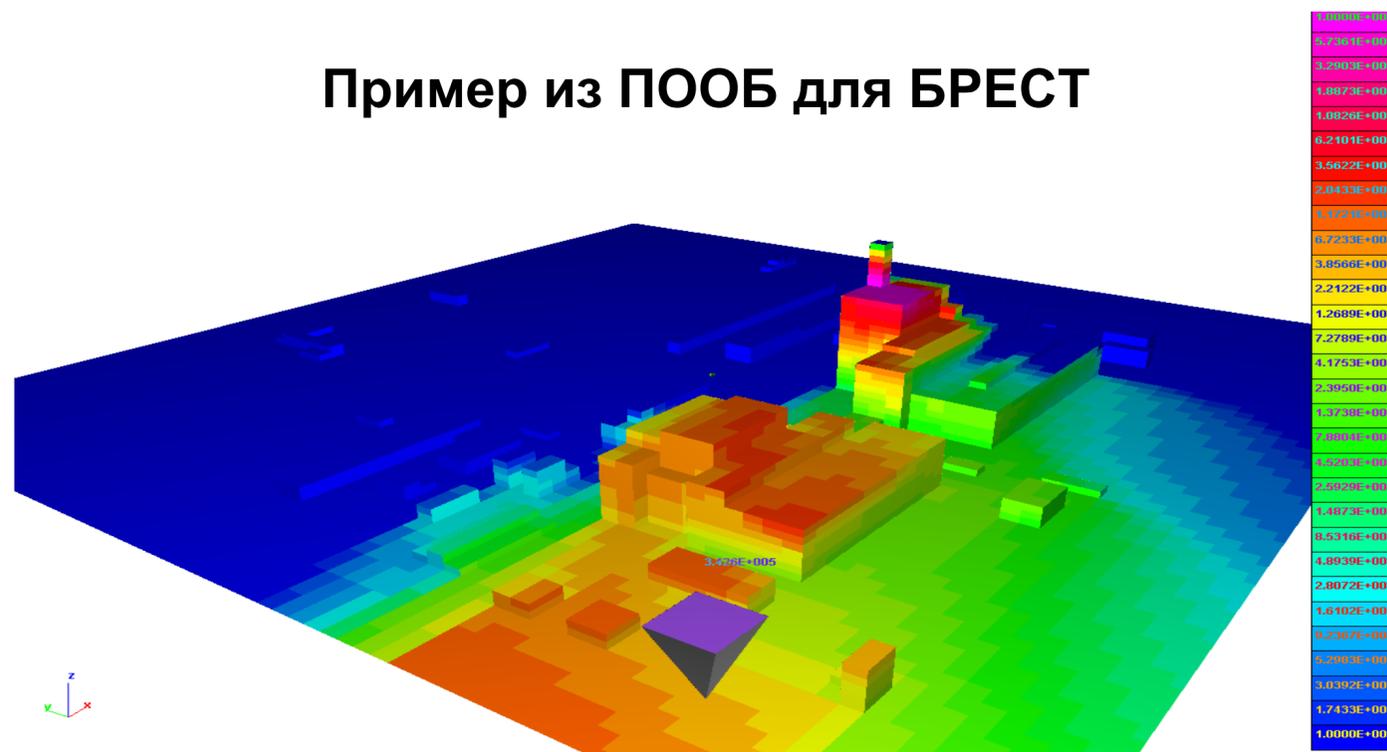


Назначение: расчет атмосферного переноса и оценка радиационной обстановки в пределах промплощадки АЭС при регулярных и аварийных выбросах радиоактивных материалов в атмосферу с учетом промышленной застройки.

Год подачи на аттестацию: 2016 г.

Текущее состояние разработки: проходит процедуру аттестации в ФБУ «НТЦ ЯРБ».

Пример из ПООБ для БРЕСТ



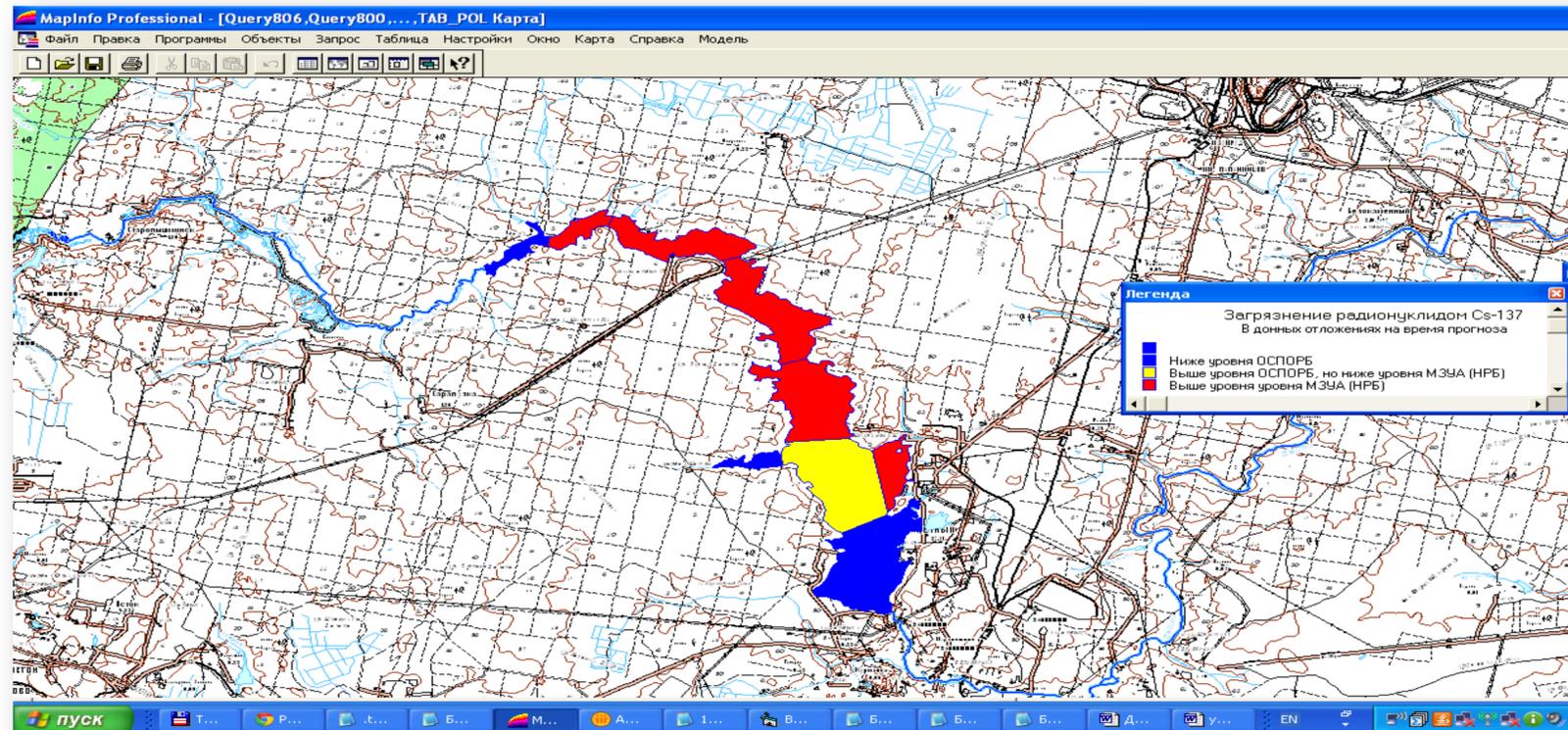
Карта дозы внешнего облучения от облака (мЗв)
при аварийном выбросе

Сценарий: Разгерметизация 25 % твэлов а.з.,
которые имеют максимальное выгорание.

Выброс в атмосферу: ^{137}Cs $-5 \cdot 10^{11}$ Бк,
 ^{133}Xe $-9,5 \cdot 10^{12}$ Бк, ^{135}Xe $-7 \cdot 10^{12}$ Бк

Результаты моделирования:

- Доза облучения на границе промплощадки за 10 суток не превысит 0,6 мЗв.
- Необходимости принятия срочных мер по защите населения нет.



Пример отображения результатов расчетов последствий гипотетического сброса Белоярской АЭС

Назначение:

оценка параметров радиологической ситуации, формируемой в поверхностных пресноводных водоемах, подверженных воздействию со стороны объектов использования атомной энергии: содержания радиоактивных веществ в воде, донных отложениях; дозы для населения за счет различных видов водопользования.

Возможное использование:

- анализ и обоснование безопасности АЭС и других ОИАЭ, производящих сбросы активности в гидросистему;
- расчет последствий как аварийного, так и штатного поступления загрязняющих веществ в водные объекты;
- поддержка принятия решений в аварийных ситуациях.

Проведение Школ-семинаров по кодам нового поколения



I Школа-семинар пользователей кодов HYDRA-IBRAE/LM, БЕРКУТ, ЕВКЛИД, GeRa, СОКРАТ-БН (27–29 ноября 2017 г., АНО ДПО «Техническая академия Росатома»).

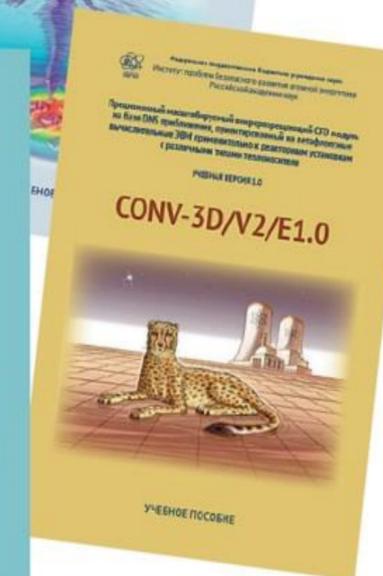
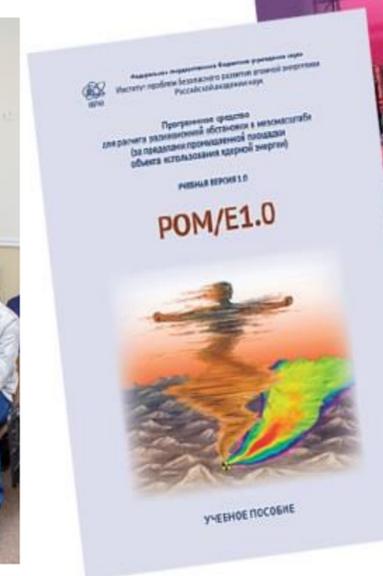
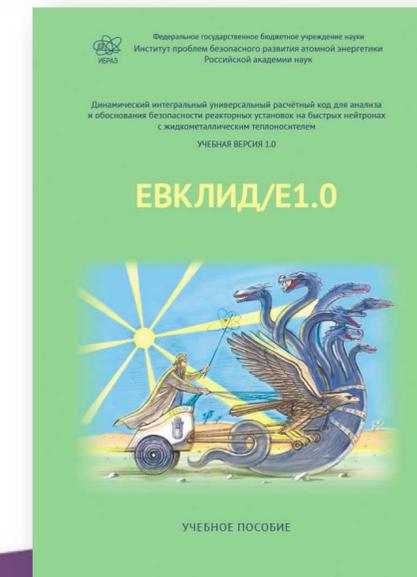
**Выпущены учебные версии и учебные пособия.
По итогам школы-семинара выдано 110 сертификатов.**

II Школа-семинар пользователей кодов РОМ, РОУЗ, Сибилла, CONV-3D, ODETTA: (12–14 ноября 2018 г., ИБРАЭ РАН).

**Выпущены учебные версии и учебные пособия.
По итогам школы-семинара выдано 39 сертификатов.**

Участие в Школе-семинаре приняли специалисты из 17 организаций:

АО «ОКБМ Африкантов», АО «НИКИЭТ», АО «АТОМПРОЕКТ», ФГУП НО РАО, НИЯУ МИФИ, СТИ НИЯУ МИФИ, ФБУ «НТЦ ЯРБ», ФГУП «ПО МАЯК», ФГБНУ ВНИИРАЭ, АО «ЦПТИ», Частное учреждение «ИТЦП «ПРОРЫВ» и другие.



- **Верифицированные компьютерные коды – аккумулятивная база знаний и основа обоснования безопасности.**
- **Верификация разработанных кодов и расширение их области применимости по мере получения дополнительных экспериментальных данных.**
- **Сопровождение эксплуатации на всех этапах жизненного цикла АЭС.**
- **Использование суперкомпьютеров и технологий параллельных вычислений даст новое качество для проектирования и обоснования безопасности АЭС.**

Спасибо за внимание