

***Опыт программы сотрудничества
РОСАТОМ - ЕВРАТОМ по проекту
водородной безопасности легководных
реакторов (ERCOSAM-SAMARA)***

А.Киселев, ИБРАЭ РАН

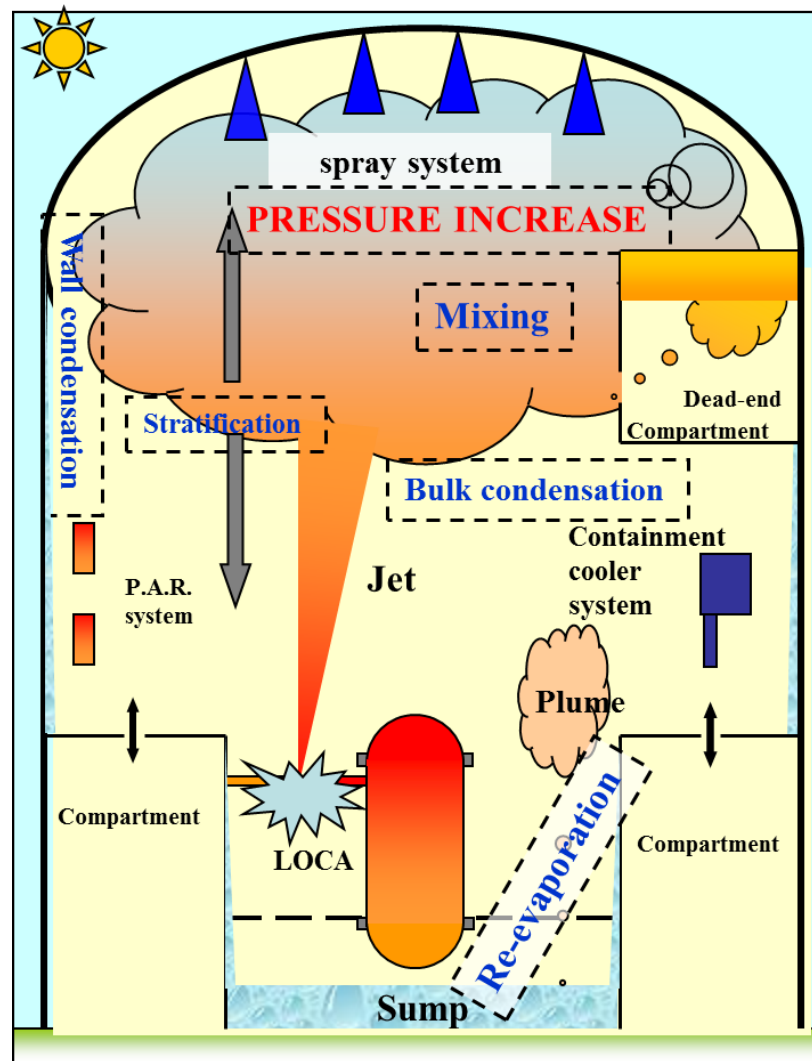
VII МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

«АТОМЭКСПО 2015»

Москва, 1 июня 2015 г

Безопасность защитной оболочки АЭС

- **Теплогидравлика 3О**
 - 3О – последний барьер безопасности
 - Мультифизические явления переноса многокомпонентной среды
- **Конструкция 3О**
 - Большое разнообразие конструкций для различных АЭС
- **Системы безопасности**
 - Рекомбинаторы водорода, системы отвода тепла, спринклеры и т.д.
- **Подходы к обоснованию безопасности**
 - Эксперименты по изучению явлений
 - Создание компьютерных программ
 - Анализ 3О АЭС с помощью верифицированных кодов



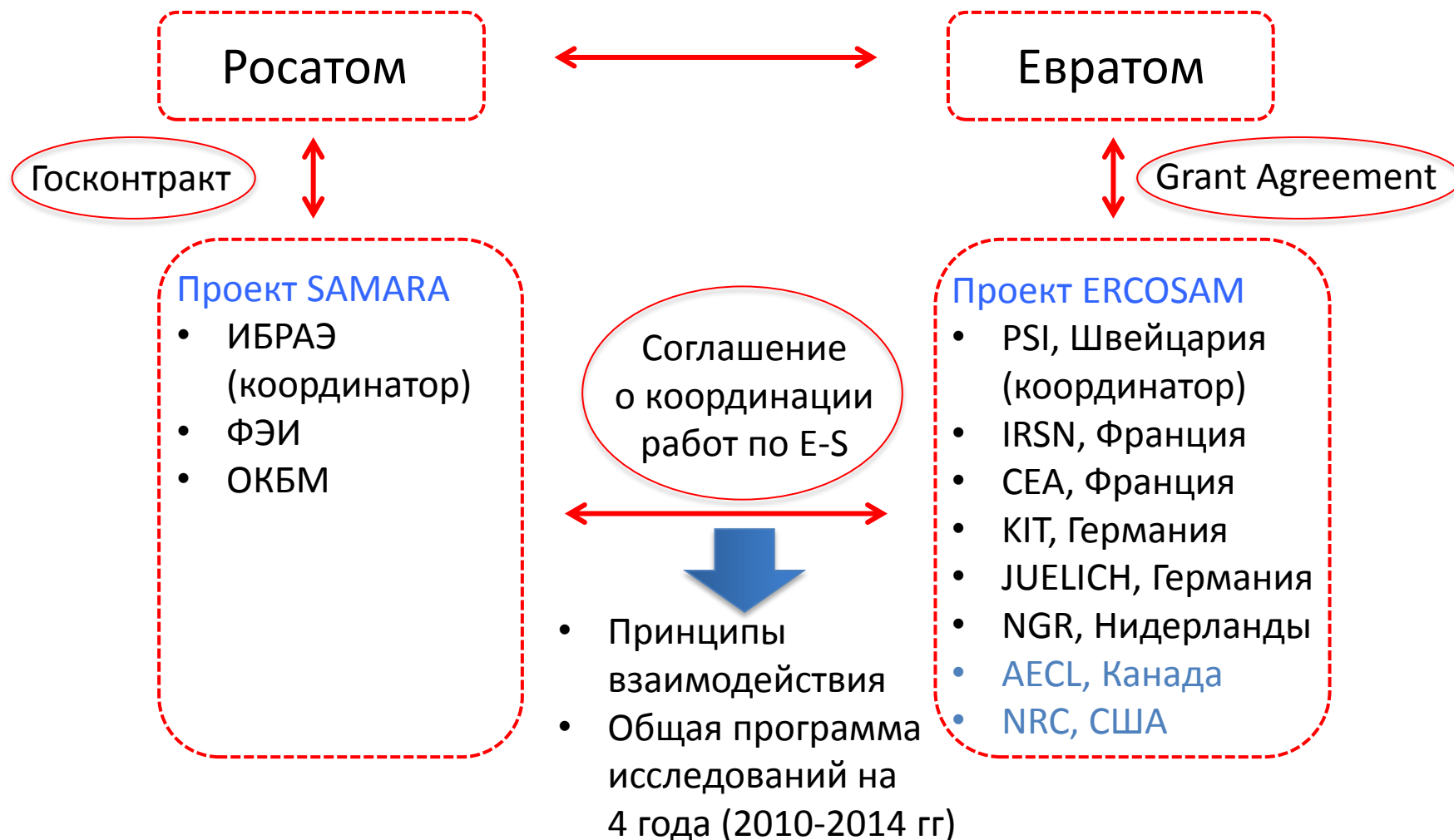
Приоритеты НИОКР по тяжелым авариям проекта SARNET в части распределения водорода

- Экспериментальное исследование переходных режимов, связанных со стратификацией.
- Потребность в дальнейшем развитии кодов с сосредоточенными параметрами и CFD кодов для улучшения описания стратификации, конденсации в присутствии неконденсируемых газов как механизма разрушения стратификации, а также для оценки влияния спринклерных систем и рекомбинаторов на развитие конвективных потоков в атмосфере.



Объединение международных усилий по изучению стратификации водорода и ее разрушения работой систем безопасности в рамках проектов ERCOSAM-SAMARA

Принципы организации международного сотрудничества в проектах ERCOSAM-SAMARA



УЧАСТНИКИ

Irene Walthert, PSI
Tanja Hogg, PSI
Tatiana Yudina, IBRAE RAN
Salih Guentay, former PSI employees (now retired)
Ahmed Bentaib, IRSN
Michele Andreani, PSI
Isabelle Tkatschenko, CEA
Jerome Brinster, CEA
Frederic Dabbene, CEA
Jeanne Malet, IRSN
Project contributors:
Matt Krause, former AECL employees
Zhe (Rita) Liang, AECL
Podila Krishna, AECL
Danielle Abdo, CEA
Marie-Pierre Bohar, CEA
Jean-Luc Widloecher, CEA
Olivier Norvez, CEA
Etienne Studer, CEA
Hans-Josef Allelein, JUELICH
Ernst-Arndt Reinecke, JUELICH
Stephan Kelm, JUELICH
Michael Klauck, JUELICH
Wilfried Jahn, JUELICH
Lasse Götz, JUELICH
Rebekka Gehr, JUELICH
Alexandr Filippov, IBRAE RAN
Alexey Zaytsev, SSC RF-IPPE
Cataldo Caroli, IRSN

Alexandre Bleyer, IRSN
Nicolas Meynet, IRSN
Pascal Lemaitre, IRSN
Emmanuel Porcheron, IRSN
Sonia Benteboula, former IRSN employees
Thomas Jordan, KIT
Stefan Benz, former KIT employees
Zhanjie Xu, KIT
Christopher Boyd, US NRC
Ed M.G. Komen, NRG
Dirk Visser, NRG
Arne Siccarna, NRG
Mikhail Anatolyevitch Kamnev, JSC “Afrikantov OKBM”
Akhmir Muginovitch Khizbullin, JSC “Afrikantov OKBM”
Oleg Tyurikov, JSC “Afrikantov OKBM”
Martin Zimmermann, PSI
Horst-Michael Prasser, PSI-ETHZ
Max Fehlmann, PSI
Ralf Kapulla, PSI
Guillaume Mignot, PSI
Sidharth Paranjape, PSI
Medhat Sharabi, PSI
Simon Suter, PSI
Robert Zboray, PSI
Camille Ellen Zimmer, PSI
Joerg Dreier, PSI
Michel Hugon, former EC employees (now retired)
Roberto Passalacqua, EC

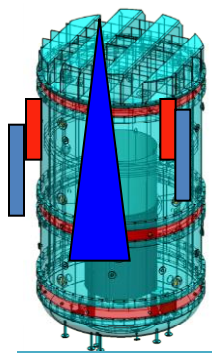
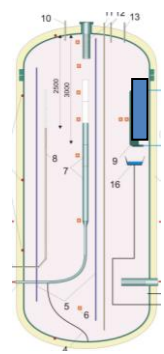
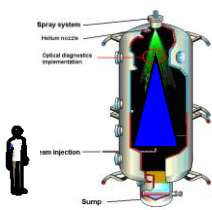
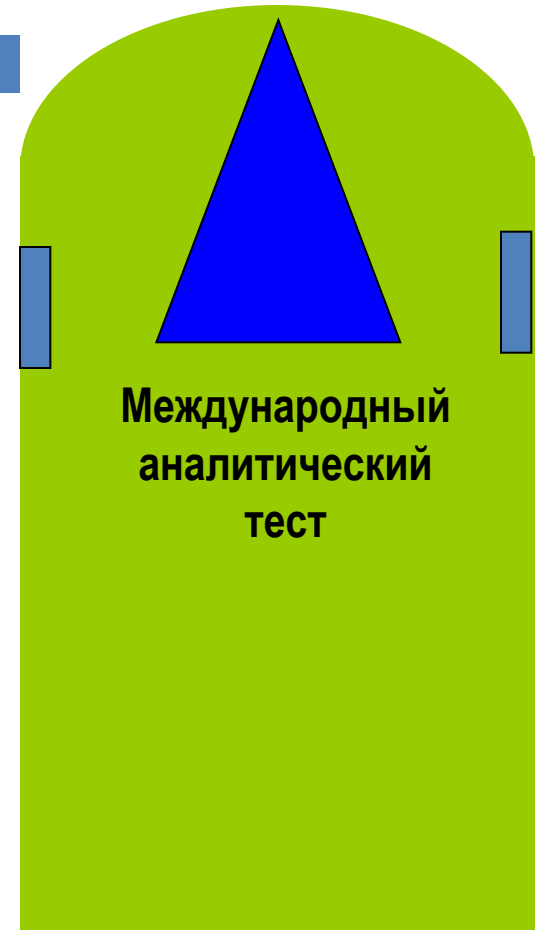
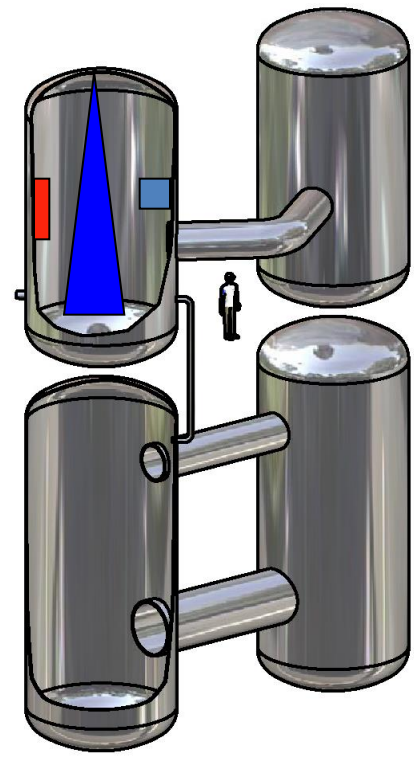
Цели исследований в проектах ERCOSAM-SAMARA

- Цель проектов: изучение возможности стратификации легкого газа в аварийных последовательностях на LWR и ее разрушения работой систем безопасности (спрей, ПАР, теплообменник-конденсатор)
- ✓ 15 экспериментов на установках малого и среднего масштаба (TOSQAN – 7 м³, СПОТ – 60 м³, MISTRA – 100 м³, PANDA – 180 м³) и
2 аналитических бенчмарка на крупномасштабной концептуальной установке HYMIX (3000 м³)
- ✓ верификация кодов (CFD, 3D и LP коды) и демонстрация возможностей современных компьютерных программ, используемых для теплогидравлического анализа контейнента, моделировать изучаемые явления

Расчетные и экспериментальные исследования

- 5 установок различного масштаба
- 3 системы безопасности
- Единый сценарий экспериментов
- Связанные начальные и граничные условия

PAR spray cooler



TOSQAN- 7 m3
IRSN

SPOT- 59 m3
Afrikantov OKB

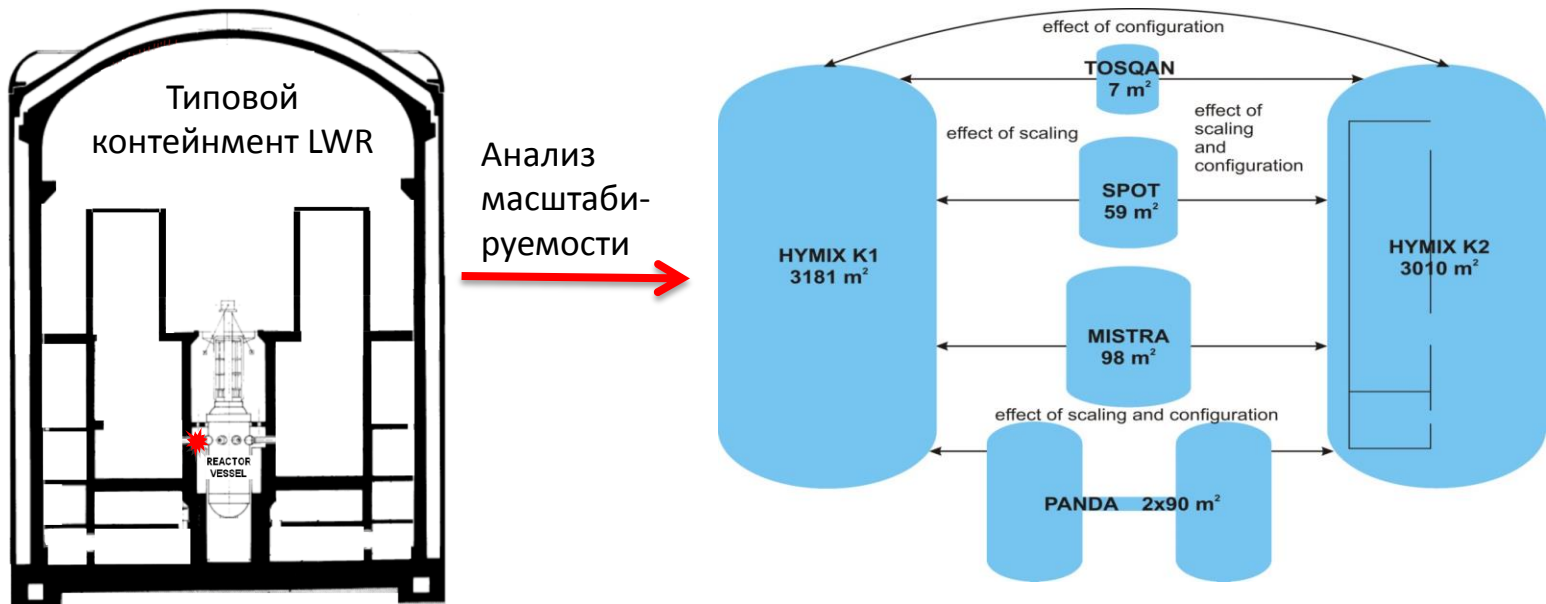
MISTRA- 100 m3
CEA

PANDA- 180 m3
PSI

HYMIX- 3000 m3
IBRAE

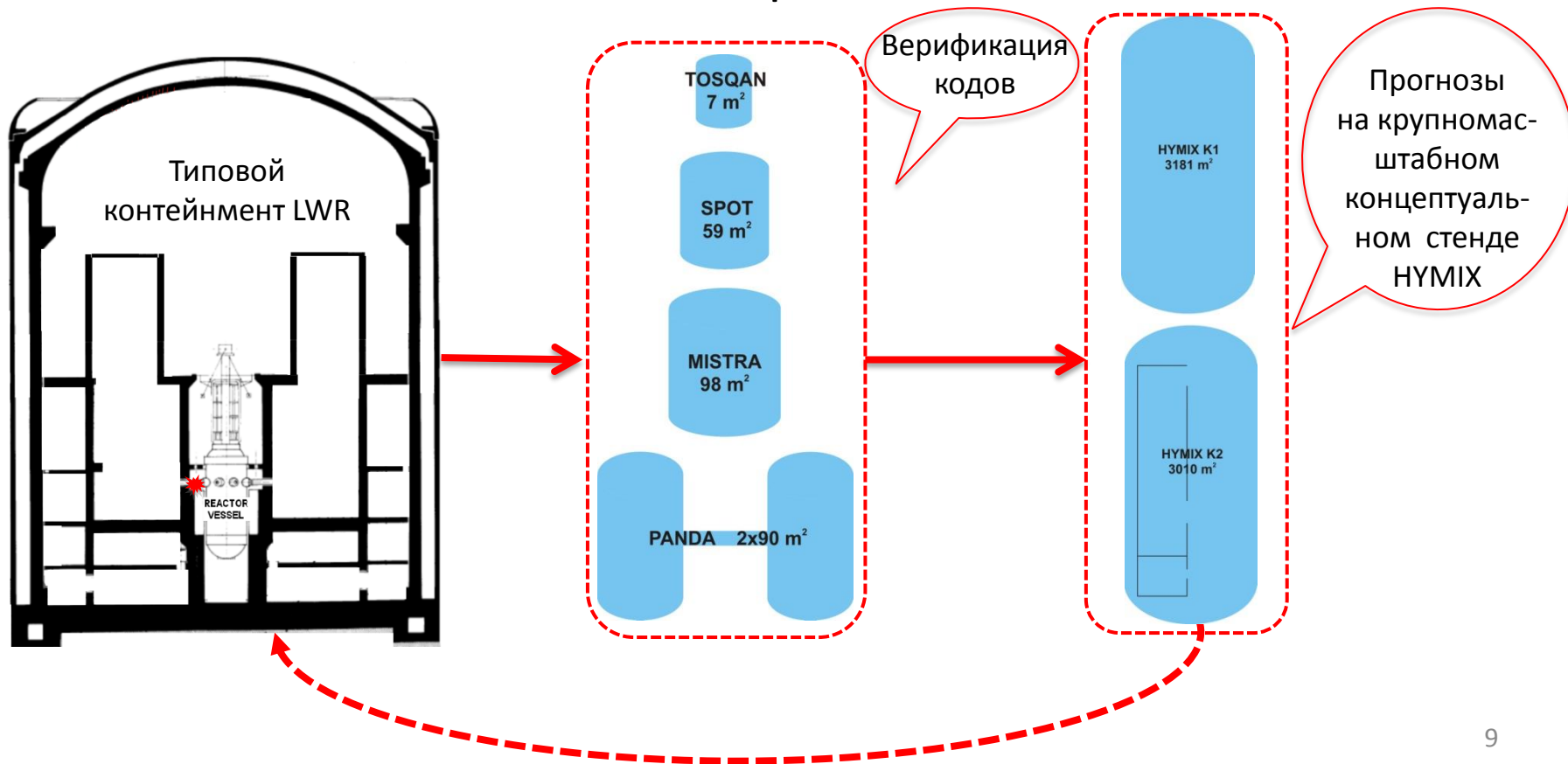
Особенности исследований ERCOSAM-SAMARA

- Связь экспериментов между собой и с полномасштабным контейнментом обеспечивается использованием единого сценария и единой методики масштабирования при переходе от аварийных условий в типовом контейнменте LWR к установкам, использованным в проектах



Особенности исследований ERCOSAM-SAMARA

- Проведена верификация и кросс-верификация различных кодов (CFD, 3D и LP): КУПОЛ, ASTEC, COCOSYS, TONUS, GASFLOW, GOTHIC, FLUENT, OpenFOAM, CFX



Организация работ (1)

- ✓ Разбиение работ на тематические пакеты (WP), составление плана-графика работ:
 - WP1: анализ масштабируемости при переходе от полномасштабных станций к экспериментальным установкам (руководитель работ IRSN)
 - WP2: планирование, пре- и посттестовый численный анализ (PSI)
 - WP3: экспериментальные исследования (CEA)
 - WP4: обобщение феноменологии и анализ возможностей кодов (IRSN)
 - WP5: управление проектами (PSI, IBRAE)

Организация работ (2)

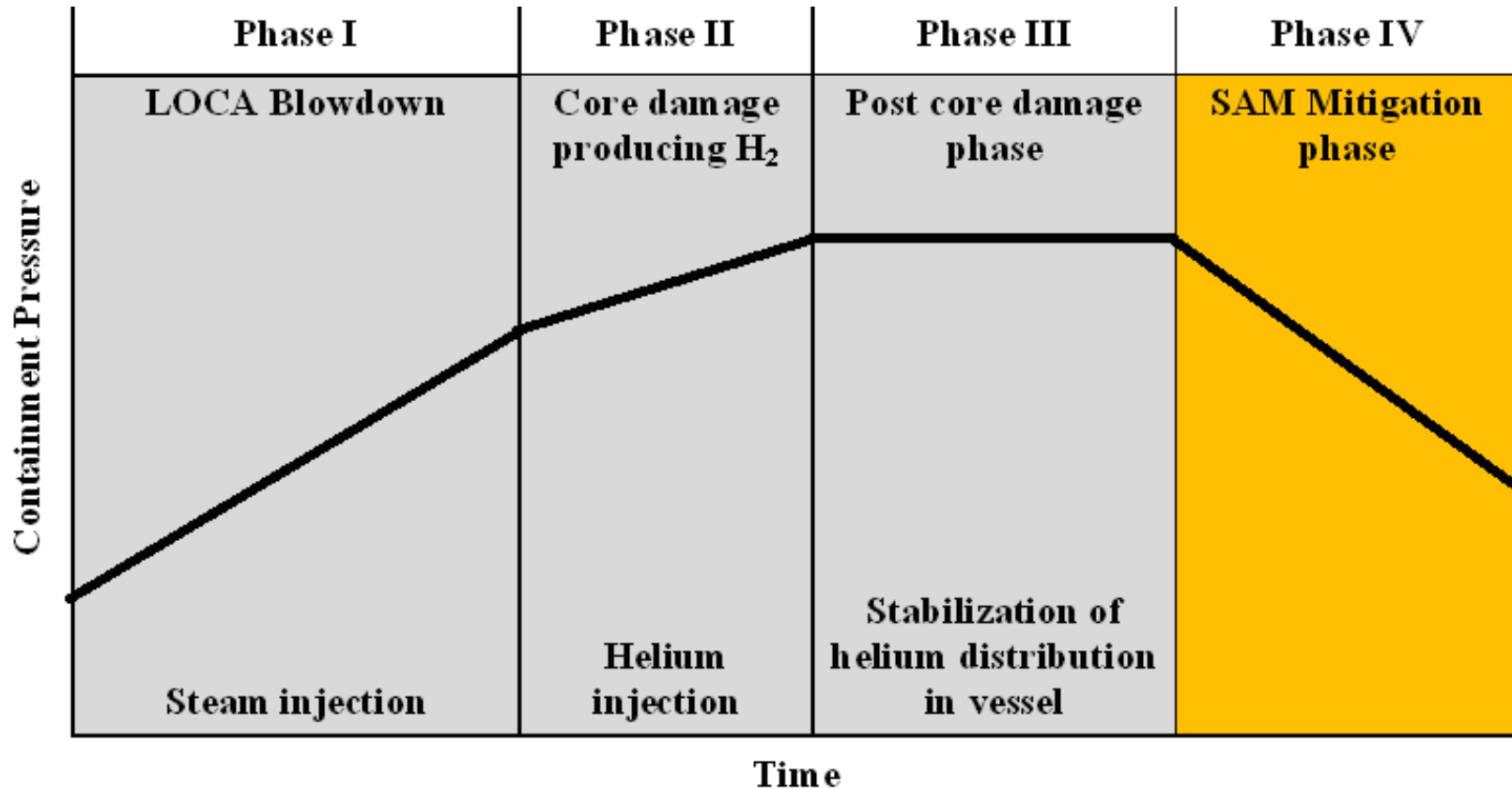
- ✓ Проведение совместных совещаний по проектам 2 раза в год (научные и организационные вопросы)
- ✓ Проведение совместных тематических совещаний по задачам WP (в том числе в режиме видеоконференций)
- ✓ Организация web-сайта для хранения и обмена информацией (свободный доступ для каждой организации-участника)

Основные публикации

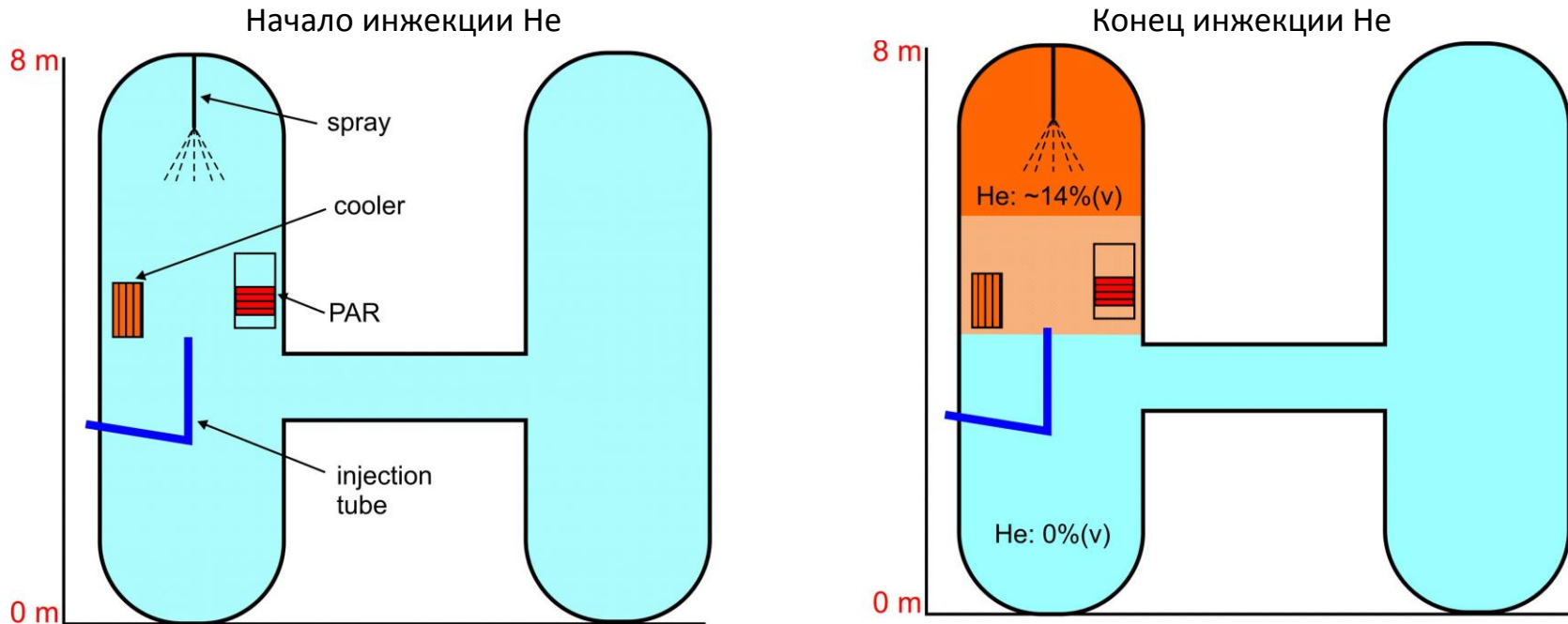
Труды ICAPP 2015 (Май 03-06, 2015, Ницца, Франция)

- D. PALADINO and A. E. KISELEV, "Main outcomes from the EURATOM-ROSATOM ERCOSAM SAMARA parallel projects for hydrogen safety of LWR", *ICAPP 2015*, Paper 15357.
- S. BENTEBOULA et al., "EUROATOM-ROSATOM ERCOSAM-SAMARA Projects: Scaling from Nuclear Power Plant to experiments", *ICAPP 2015*, Paper 15378.
- F. DABBENE et al., "Experimental Activities on Stratification and Mixing of a Gas Mixture under the Conditions of a Severe Accident with Intervention of Mitigating Measures Performed in the ERCOSAM-SAMARA Project", *ICAPP 2015*, Paper 15158.
- M. ANDREANI et al., "Modelling of Stratification and Mixing of a Gas Mixture under the Conditions of a Severe Accident with Intervention of Mitigating Measures", *ICAPP 2015*, Paper 15348.
- J. MALET et al., "Analysis of Stratification and Mixing of a Gas Mixture under Severe Accident Conditions with Intervention of Mitigating Measures", *ICAPP 2015*, Paper 15381.
- M. KAMNEV et al., "Overview of SPOT Experimental and Analytical Activities with KUPOL", *ICAPP 2015*, Paper 15455.
- A.S. FILIPPOV et al., "Complete CFD Analysis of ERCOSAM-SAMARA Exercises: A Step Towards Advanced Modeling Of LWR Containment Under Severe Accident Conditions", *ICAPP 2015*, Paper 15309.
- T.YUDINA et al., "HYMIX benchmarking tests: code-to-code comparison", *ICAPP 2015*, Paper 15363.

Сценарий экспериментов



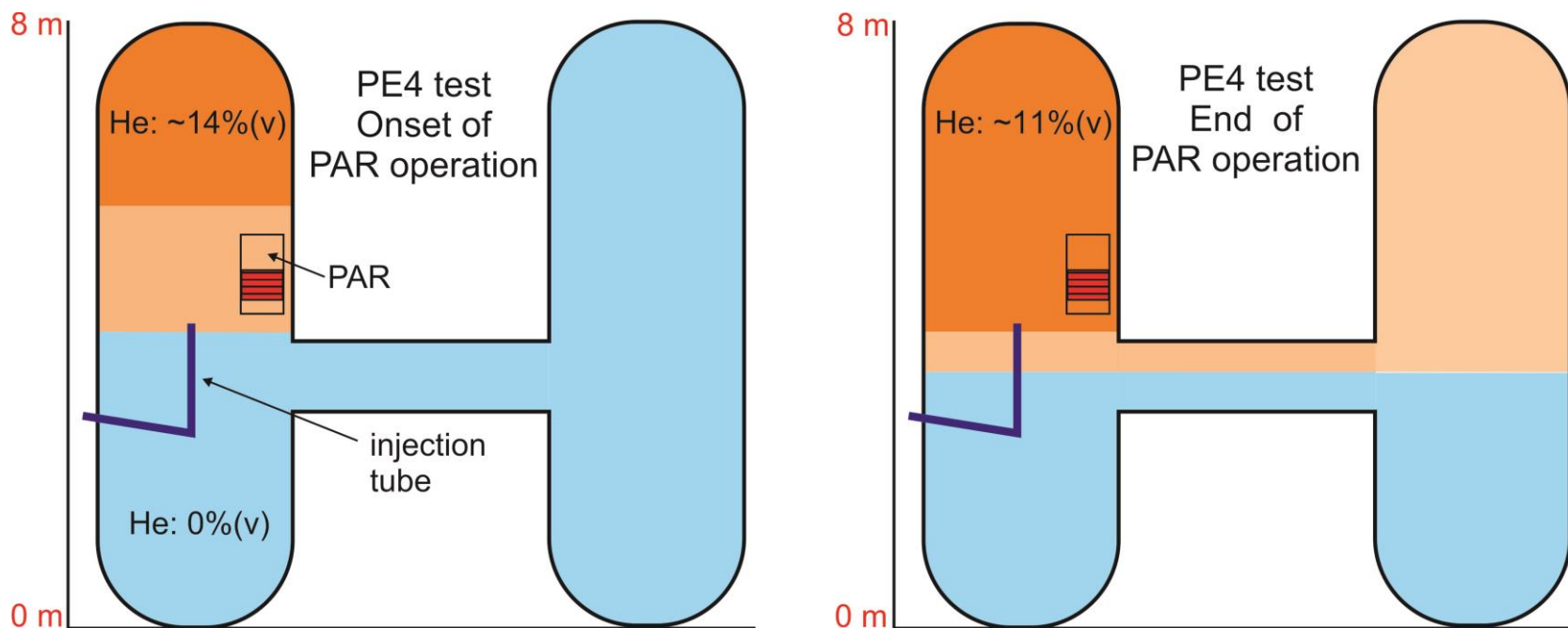
Основные результаты: формирование стратификации



Эксперименты на установке PANDA

- Результат инъекции гелия - формирование облака, обогащенного легким газом, над уровнем инъекции

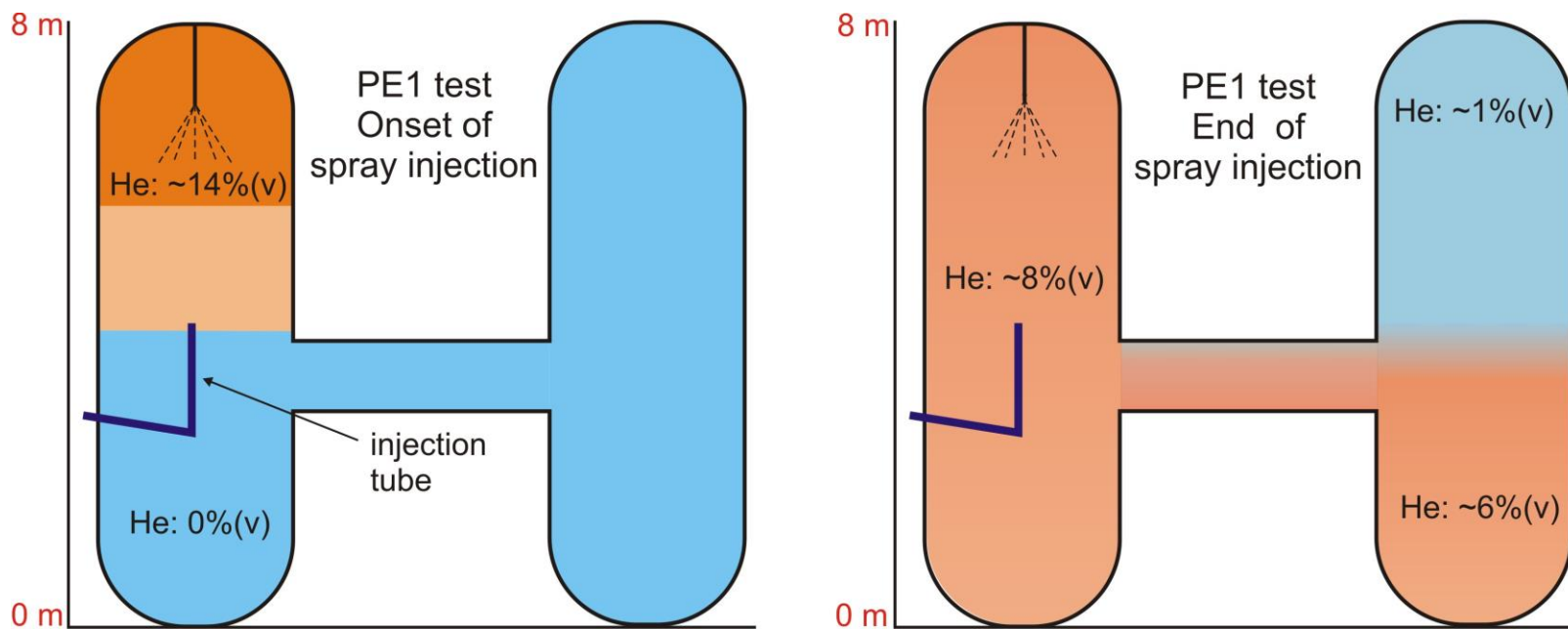
Основные результаты: эффект работы ПАР



Эксперименты на установке PANDA

- Сохранение стратификации
- Гомогенизация облака гелия и небольшое смещение переходного слоя вниз

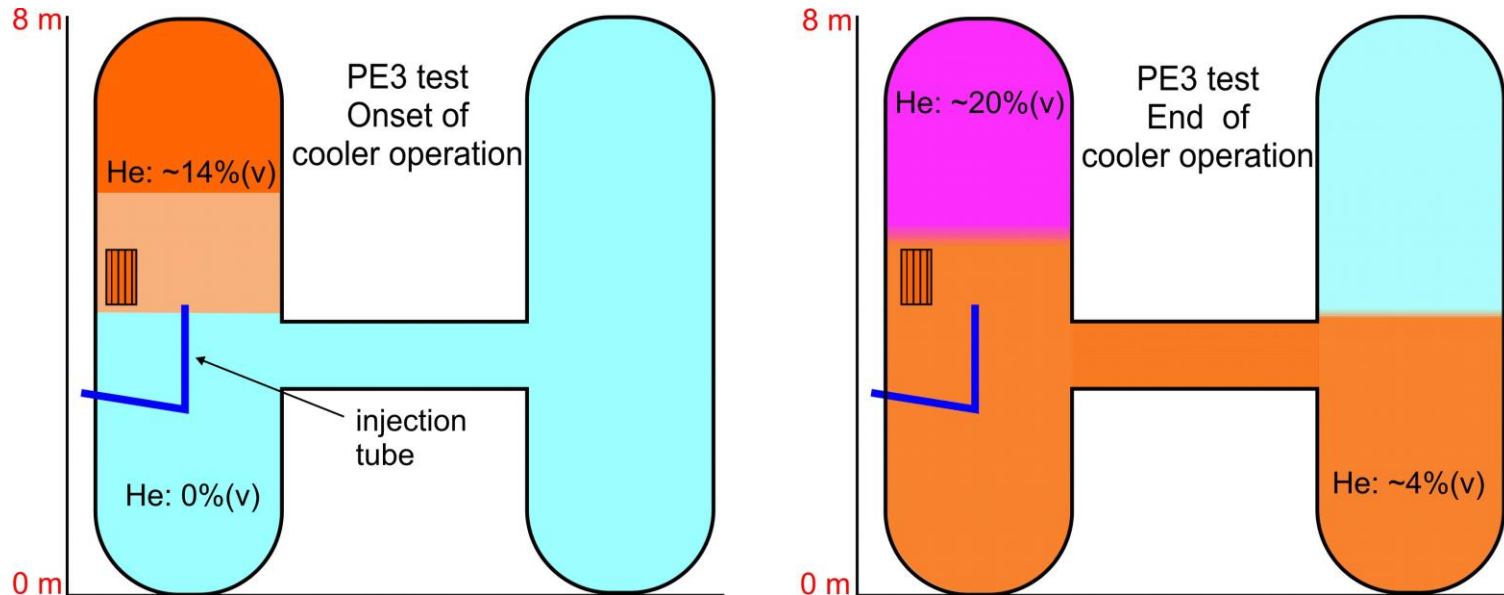
Основные результаты: эффект работы спрея



Эксперименты на установке PANDA

- Быстрое разрушение стратификации и гомогенизация атмосферы в сосуде
- Формирование инверсной стратификации в смежном сосуде

Основные результаты: эффект работы теплообменника-конденсатора



Эксперименты на установке PANDA

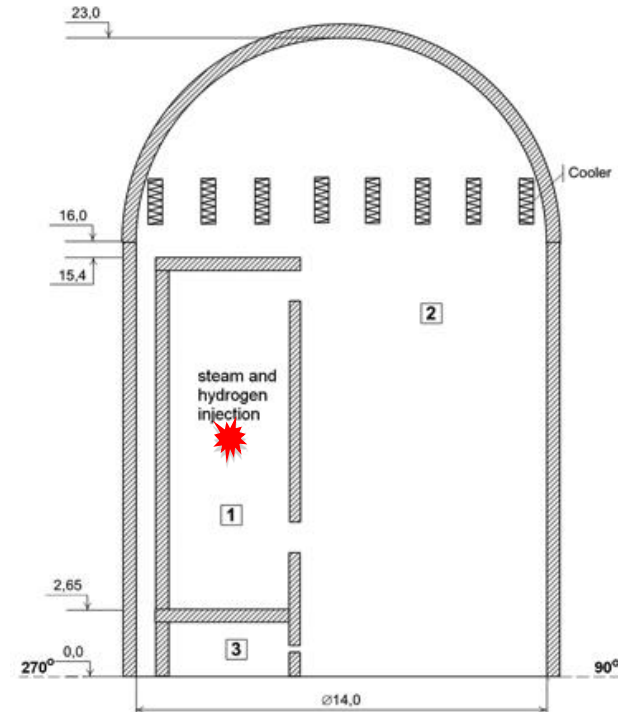
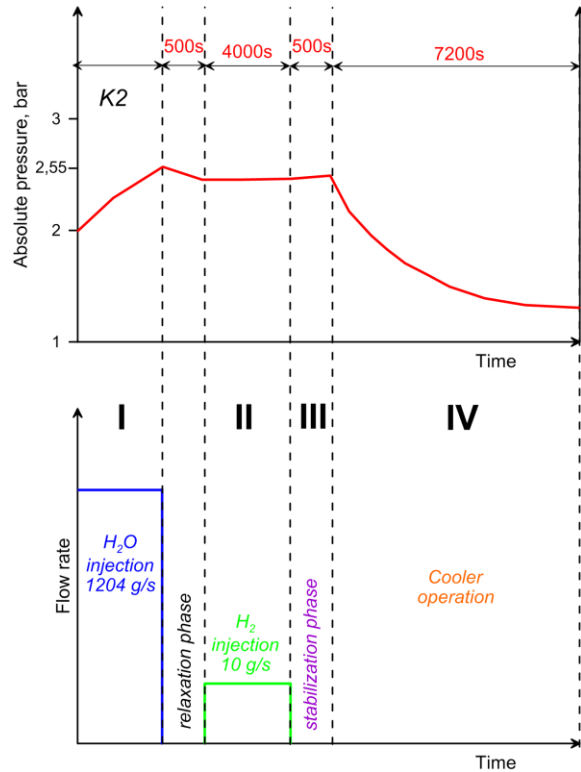
- Сохранение облака гелия выше теплообменника
- Перемешивание в области теплообменника и ниже
- Формирование инверсной стратификация в смежном сосуде

Аналитические бенчмарки НУМІХ.

Коды и участники

Организация	Код, версия	Тип кода	K1	K2
KIT	GASFLOW 3.2	3D	✓	✓
AECL	GOTHIC 8.0	3D	✓	
PSI	GOTHIC 8.0	3D		✓
ГНЦ РФ-ФЭИ	KUPOL-M 1.10	LP	✓	✓
IRSN	ASTEC 2.0.2p3	LP	✓	✓ фаза кулера не моделировалась
ИБРАЭ РАН	FLUENT 12.1.4	CFD	✓	✓
ИБРАЭ РАН	OpenFOAM-2.1x	CFD	✓	
JUELICH	COCOSYS v2.4	LP		✓

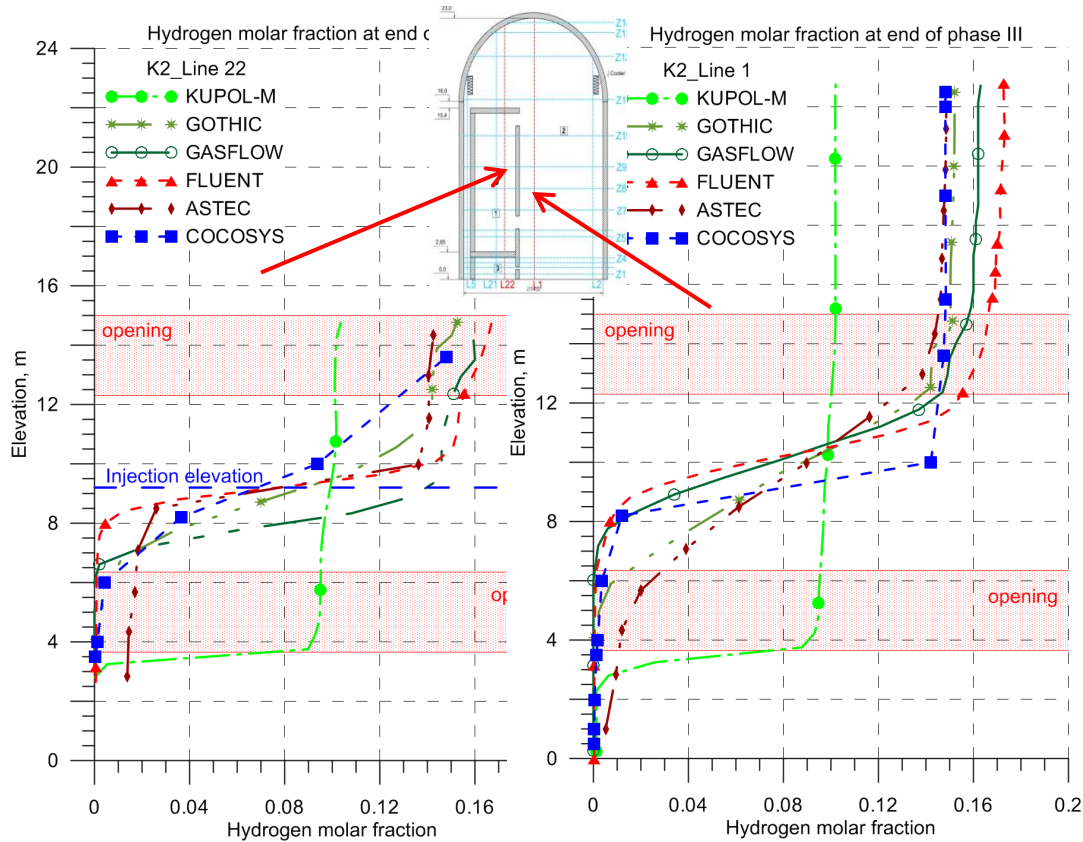
Сценарий теста K2



- ✓ Для имитации аварийного бокса парогенератора в контейнентах АЭС в тесте K2 введено отдельное помещение, а котором размещены источники пара и водорода
- ✓ 36 теплообменников-конденсаторов расположены в подкупольном пространстве равномерно по окружности; модель каждого теплообменника - как в экспериментах S1 и S2 на установке СПОТ

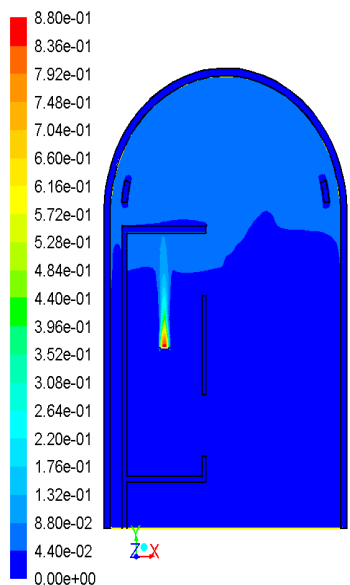
Распределение H_2 в конце фазы III.

Тест K2

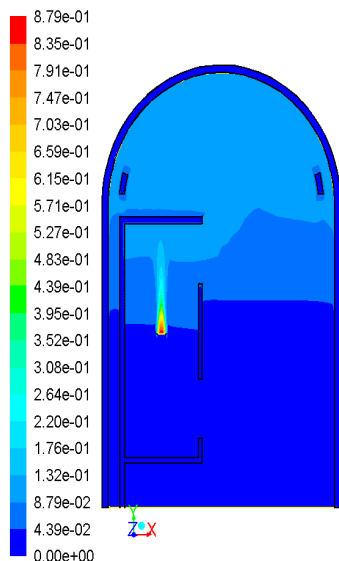


- ✓ 3D/CFD коды показывают формирование стратификации в помещении 1 с инъекцией и в смежном помещении 2. Распределения H_2 в обоих помещениях качественно близки к прогнозам в тесте K1: водород аккумулируется выше уровня инъекции, роль отверстия инъекции в помещении 2 играет верхний проем
- ✓ LP коды прогнозируют противоположные тренды – равномерное распределение (KUPOL-M) или стратификация (ASTEC и COCOSYS) в соответствии с предположением о картине течений, используемом при разработке нодализационной схемы (равномерное перемешивание в пределах помещения или струйное течение)
- ✓ Разброс прогнозных максимальных мольных долей водорода варьирует от 14% до 16% в помещении с инъекцией и от 15% до 17% в помещении 2

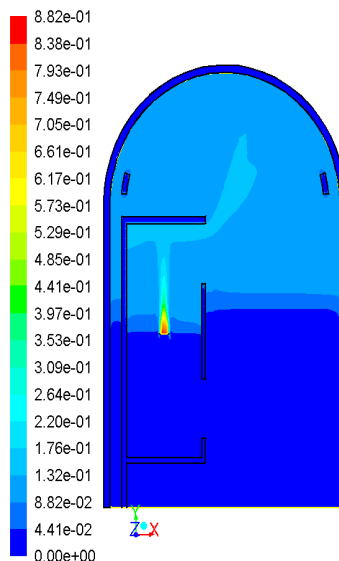
Визуализация распределения H_2 на фазе II в расчете по коду FLUENT



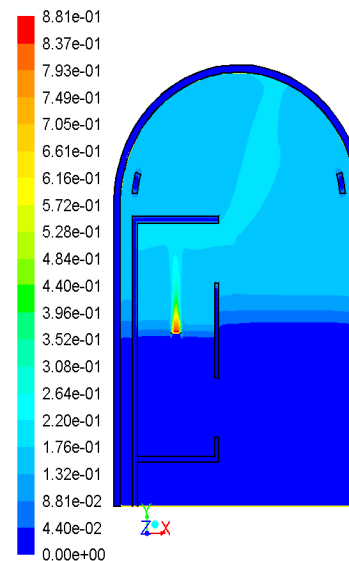
Инжекция H_2
в течение
1000 с



Инжекция H_2 в
течение 2000 с



Инжекция H_2
в течение
3000 с



Конец
фазы II

- ✓ Формирование в верхней части сосуда стабильного единого протяженного облака, обогащенного H_2

Основные выводы

- Проект ERCOSAM-SAMARA успешно выполнен в рамках сотрудничества Росатом-Евратом при широком участии европейских и российских научных организаций и присоединившихся к проекту организаций США (US NRC) и Канады (AECL)
- В целом, мировым научным сообществом проект оценивается как шаг вперед в понимании феноменологии поведения контейнмента АЭС с реакторами ВВЭР и PWR при тяжелых авариях и верификации современных компьютерных программ
- Явления, наблюдаемые на установках малого и среднего масштаба, - стратификация водорода, ее разрушение работой спрея и медленная эрозия в результате работы теплообменника – прогнозируются на конфигурации большого масштаба Nymix, как LP, так и 3D/CFD кодами
- Результаты ERCOSAM-SAMARA позволили качественно и количественно изучить спектр физических явлений, существенных для анализа безопасности защитной оболочки АЭС при тяжелых авариях, понимание природы которых позволит обеспечивать водородную взрывобезопасность действующих и будущих АЭС.