УДК 621.039.586

Исследования, выполненные на комплексе экспериментальных установок «Расплав» отдела исследований тяжёлых аварий ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»

[1, 2]В.И.Альмяшев, [1]В.Б. Хабенский, [1]Е.В. Крушинов, [1]С.А. Витоль, [1]А.А. Сулацкий, [1]Е.В. Шевченко

[1] ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия;

[2] ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В статье приведен обзор направлений и результатов экспериментальных работ в области исследований тяжёлых аварий АЭС, проводимых на комплексе экспериментальных установок «Расплав» в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова». Результаты проведенных работ актуальны и используются для обоснования систем безопасности АЭС, повышения точности прогнозирования сценариев тяжёлых аварий на АЭС, при разработке и обосновании функционирования в экстремальных условиях новых материалов атомной энергетики.

Ключевые слова: тяжёлые аварии, кориум, безопасность АЭС, комплекс экспериментальных установок «Расплав» (КЭУ «Расплав»), индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ).

UDC 621.039.586

Studies carried out at the “Rasplav” platform of severe accidents research department of FSUE Alexandrov NITI

[1,2]V.I. Almjashev, [1]V.B. Khabensky, [1]E.V. Krushinov, [1]S.A. Vitol, [1]A.A. Sulatsky, [1]E.V. Shevchenko

[1] Alexandrov Research Institute of Technology (NITI), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia;

[2] Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The article provides an overview of the directions and results of experimental work in the field of research of severe accidents carried out at the set of experimental facilities “Rasplav” at Alexandrov NITI. The results of the work carried out are widely used to substantiate safety systems for nuclear power plants, improve the accuracy of predicting severe accident scenarios at nuclear power plants, in the development and substantiation of the functioning of new materials for nuclear power in extreme conditions.

Key words: severe accidents, corium, NPP safety, set of experimental facilities “Rasplav” (“Rasplav” platform), induction melting in a cold crucible (IMCC).

Введение

Тематика запроектных тяжёлых аварий на АЭС приобрела актуальность главным образом после аварии на Чернобыльской АЭС. Во ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» соответствующие исследования начали проводиться с 1989 года в связи с его привлечением Санкт-Петербургским институтом «Атомэнергопроект» к расчётно-экспериментальному обоснованию систем безопасности нового энергоблока АЭС средней мощности с реактором ВВЭР-640.

В дальнейшем участие ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» в отработке и обосновании новых проектов энергоблоков АЭС существенно расширилось.

В 1992 году в составе ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» был образован Северо-западный научно-промышленный центр атомной энергетики (НПЦ АЭ), основными задачами которого являлись:

- комплексное обоснование проектных решений по безопасности АЭС и отработка технологии создания серийных энергоблоков нового поколения АЭС с ВВЭР;
- расчётно-экспериментальные исследования процессов в пассивных системах безопасности и при запроектных, в том числе тяжёлых, авариях;
- обучение и подготовка эксплуатационного персонала АЭС.

В соответствии с поставленными задачами в состав НПЦ АЭ должны были входить:

- головной энергоблок АЭС с ВВЭР-640;
- отделение исследовательских стендов для изучения и оптимизации процессов в пассивных системах безопасности, включая процессы в контейнменте и процессы в высокотемпературном прототипном расплаве кориума при тяжёлых авариях с плавлением активной зоны;
- учебно-тренажерный комплекс для подготовки персонала АЭС головного и серийных блоков и кризисный центр для фиксации в режиме он-лайн аварийных ситуаций на энергоблоках, их моделирование и анализ.

Проект энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-640 был завершен и прошел лицензирование в полном объёме, однако его сооружение по ряду причин не было реализовано. Соответственно, состав НПЦ АЭ был ограничен Отделением исследовательских стендов, включающим:

- отдел крупномасштабного стенда (КМС) для исследования теплогидравлических процессов в контейнменте и пассивных системах безопасности;
- отдел исследований тяжёлых аварий (ОИТА) для экспериментально-расчётных исследований процессов в высокотемпературном расплаве прототипного кориума при тяжёлой аварии АЭС с плавлением активной зоны.

История ОИТА начинается в 1988 году с создания установки «Расплав-2» на территории Ленинградского специализированного комбината по утилизации отходов «Радон» (в настоящее время Ленинградское отделение филиала Северо-западного территориального округа ФГУП «ФЭО»). Эта установка была спроектирована отделом ВНИПИЭТ совместно со специалистами Ленинградского электротехнического института (в настоящее время СПбГЭТУ «ЛЭТИ») в сотрудничестве с НИЦ «Курчатовский институт» и использовала для приготовления расплава урансодержащего кориума технологию индукционной плавки в холодном тигле (ИПХТ), разработанную в 60-х годах XX века в ЛЭТИ Ю.Б. Петровым [1–3]. Первые экспериментальные плавки урансодержащего кориума на установке «Расплав-2» были проведены в 1990 году.

В 1993 году во ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» на базе установки «Расплав-2» была

образована лаборатория исследований кориума, в штат которой входила группа сотрудников ВНИПИЭТ. Впоследствии лаборатория была реорганизована в ОИТА.

В настоящее время в ОИТА работают высококвалифицированные специалисты, в том числе доктор технических наук, кандидаты технических и химических наук, инженеры-технологи, инженеры-химики, а также нженерно-технический персонал. За время существования отдела было проведено более ста экспериментальных НИР, выпущено более двухсот научно-технических отчётов, опубликовано более ста статей, в том числе, в высокорейтинговых зарубежных журналах. Получено более десяти авторских свидетельств и патентов, в том числе, международных.

Экспериментальная база ОИТА расширялась и совершенствовалась и к настоящему времени представляет собой комплекс экспериментальных установок «Расплав», включающий несколько основных установок (характеристики которых приведены ниже в таблице), а также дополнительное оборудование для исследования высокотемпературных процессов – микропечь Галахова усовершенствованной сотрудниками ОИТА конструкции и высокотемпературный дифференциально-термический анализатор SETARAM Setsys Evolution 24.

Таблица

Характеристики комплекса экспериментальных установок «Расплав»

Параметры	Наименование установки					
	РАСПЛАВ-2	РАСПЛАВ-2С	РАСПЛАВ-3	РАСПЛАВ-4	РАСПЛАВ-5	РАСПЛАВ-СТЕКЛО
Метод	Индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ)					
Установленная мощность, кВт	260	260	100	60	25	160
Частота тока при нагреве, МГц	1.76	1.76	0.12	5.28	0.01	0.44
Масса расплава в тигле, кг	до 5	до 10	до 2	до 5	до 2	до 200
Температура расплава, °С	до 3000				до 2200	до 1500
Атмосфера	Воздух, N_2, He, Ar, пар и их смеси	Воздух	Воздух, N_2, He, Ar, пар и их смеси			Воздух
Состав расплава	Оксидные расплавы		Оксидные, металлические, карбидные, нитридные и смешанные расплавы	Расплавы с высоким электро-сопротивлением	Металлические расплавы, системы «расплав – дебрис»	Фосфатные и боросиликатные стекла + продукты деления
Возможные манипуляции с расплавом	Охлаждение	Слив расплава	Охлаждение			Слив расплава
Год запуска установки	1988	1995	1999	2007	2014	2012

На рис. 1 приведена принципиальная схема комплекса экспериментальных установок «Расплав», а на рис. 2 приведены схема и фотография одной из установок, газо-аэрозольная схема системы, а также вид поверхности расплава при проведении визуально-политермического анализа в условиях ИПХТ и результаты численного моделирования распределения температуры в ванне расплава [4, 5].

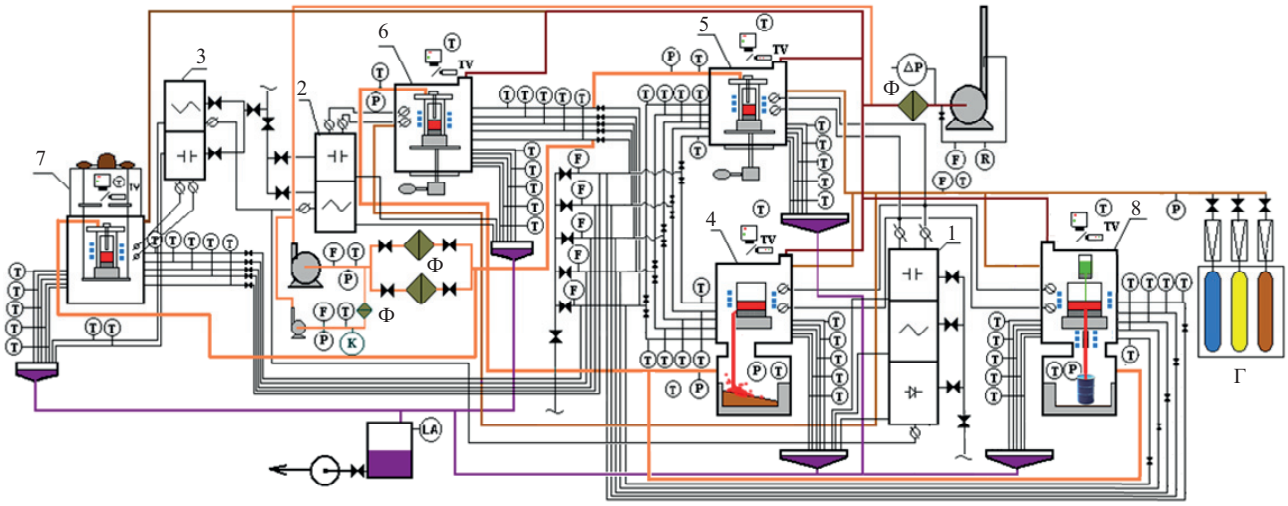


Рис. 1. Схема комплекса экспериментальных установок «Расплав»

1 – генераторные блоки ВЧГ8-160/1.76, ВЧГ9-60/0.44 и ВГТ7-25/10;
2 – генератор ВЧГ7-60/0.12;
3 – генератор ВЧГ12-60/5.28;
4 – установка «Расплав-2С»/ (бокс, ориентированный на проведение экспериментов со сливом расплава, герметизированный объём с возможностью работы в защитной среде);
5 – установки «Расплав-2»/«Расплав-5» (перчаточный бокс с возможностью пробоотбора и перемещения тигля);
6 – установка «Расплав-3» (перчаточный бокс с возможностью пробоотбора и перемещения тигля);
7 – установка «Расплав-4» (ростовая установка с системой медленной вытяжки расплава);
8 – установка «Расплав-Стекло» (установка, ориентированная на проблематику остекловывания РАО):
T – датчики измерения температуры; F – расходомеры; R – дозиметр-радиометр; K – газовые датчики;
Ф – газовые фильтры; LA – циркуляционная система водообмена и охлаждения;
Г – система подачи газовых смесей.

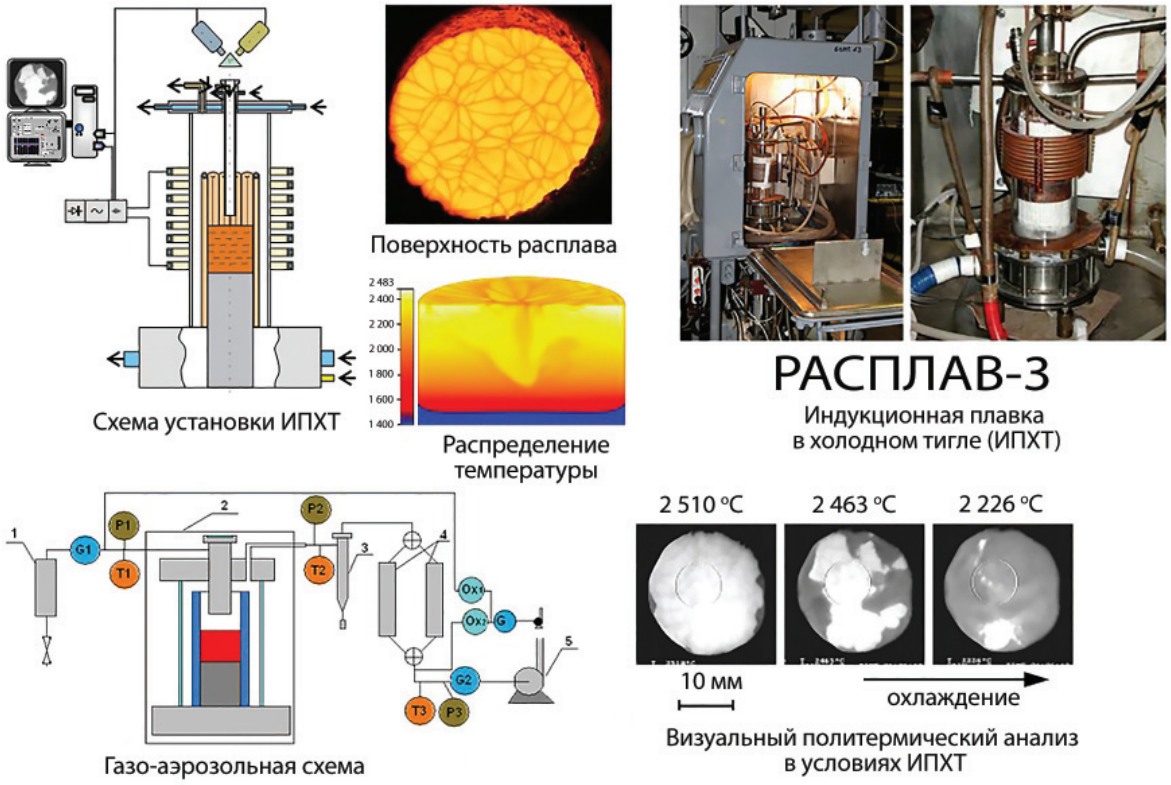


Рис. 2. Схема и внешний вид установки «Расплав-3», газо-аэрозольная схема комплекса

Большинство работ ОИТА проводятся в сотрудничестве с отделом теплофизических исследований ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», в котором разрабатывались расчётные модели и коды для описания процессов в расплаве кориума с привлечением экспериментальных результатов, полученных на установках экспериментального комплекса «Расплав», а также велись экспериментально-расчётные исследования теплогидравлических процессов в системе наружного охлаждения корпуса устройства локализации расплава. Научно-исследовательские работы ОИТА ведутся совместно с научными и научно-образовательными учреждениями Санкт-Петербурга и Москвы: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ИХС РАН, СПбГТИ (ТУ), ФТИ им. А.Ф. Иоффе, АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», АО «Атомпроект», ИБРАЭ РАН.

Выполненные и проводимые работы ОИТА в области тяжёлых аварий АЭС целесообразно разделить на следующие основные направления.

Направление I Разработка и обоснование локализации расплава кориума при тяжёлых авариях АЭС для российских и зарубежных водо-водяных реакторов.

Направление II Экспериментально-расчётные исследования локальных физико-химических и теплогидравлических процессов в расплаве кориума применительно к обоснованию ловушек расплава.

Направление III Экспериментально-расчётные исследования локальных физико-химических процессов в расплаве прототипного кориума применительно к концепции удержания расплава в корпусе реактора.

Направление IV Экспериментально-расчётные исследования локальных физико-химических процессов в расплаве прототипного кориума на внекорпусной стадии развития тяжёлой аварии.

Направление V Экспериментально-расчётные исследования локальных физико-химических процессов в перспективных реакторах.

Направление VI Отработка технологии остекловывания РАО методом индукционной плавки в холодном тигле.

Направление VII Разработка и исследование материалов и технологий для безопасности АЭС.

Основные результаты, полученные по направлениям работ ОИТА

Направление I. Разработка и обоснование локализации расплава кориума при тяжёлых авариях АЭС для российских и зарубежных водо-водяных реакторов:

- обоснование внутрикорпусного удержания расплава кориума для АЭС с ВВЭР-640 (1992–1997 годы);
- разработка концепции устройства локализации расплава кориума (УЛР) тигельного типа для Тяньваньской АЭС в Китае с ВВЭР-1000 (1997–1998 годы);
- участие в разработке и обосновании работоспособности УЛР тигельного типа для АЭС нового поколения с ВВЭР-1000 – Тяньваньская АЭС в Китае и АЭС «Куданкулам» в Индии (1998–2005 годы);
- разработка жертвенного материала для УЛР Тяньваньской АЭС в Китае и АЭС «Куданкулам» в Индии (1998–2005 годы);
- обоснование внутрикорпусного удержания расплава кориума для АЭС с ВВЭР-440 (2002–2003 годы);

– участие в разработке и обосновании работоспособности УЛР тигельного типа для АЭС с ВВЭР-1500 (2003–2005 годы);
– участие в модернизации УЛР тигельного типа для АЭС ВВЭР-2006 (2009–2011 годы);
– разработка жертвенного материала и обоснование работоспособности УЛР для южнокорейского водо-водяного реактора Eu-APR1400 (2010–2013 годы);
– разработка концепции системы внекорпусного удержания расплава на действующих энергоблоках АЭС (2017–2018 годы).

По результатам тендера, объявленного Минатомом в 1997 году, разработанная с участием специалистов ОИТА «тигельная» концепция ловушки расплава была принята к реализации. Практическая реализация проекта по созданию ловушки расплава начата в конце 1998 года в рамках консорциума российских организаций: СПб «Атомэнергопроект», ПКФ «Росэнергоатом», ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», Институт химии силикатов (ИХС) РАН, НИЦ «Курчатовский институт», СПбГТИ (ТУ), СПбГЭТУ «ЛЭТИ», и ИБРАЭ РАН.

За короткий срок был выполнен большой объём экспериментально-расчётных, проектных и конструкторских работ. В результате, на основании разработанных концепций (водоохлаждаемый тигельный корпус ловушки расплава, состав и соотношение компонентов жертвенного материала), подтвержденных расчётно-экспериментальными исследованиями, были сооружены ловушки расплава для реакторов энергоблоков с ВВЭР-1000 Тяньванской АЭС в Китае, АЭС «Куданкулам» в Индии и АЭС-2006 в России. Таким образом, впервые в мировой практике энергоблоки АЭС с ВВЭР были оборудованы специальными внекорпусными устройствами локализации расплава.

Схемы устройств локализации расплава и фотографии монтажа ловушек расплава на строящихся Тяньваньской АЭС в Китае, АЭС «Куданкулам» в Индии, Белорусской АЭС, Ленинградской АЭС и Нововоронежской АЭС приведены ниже на рис. 3 и рис. 4.

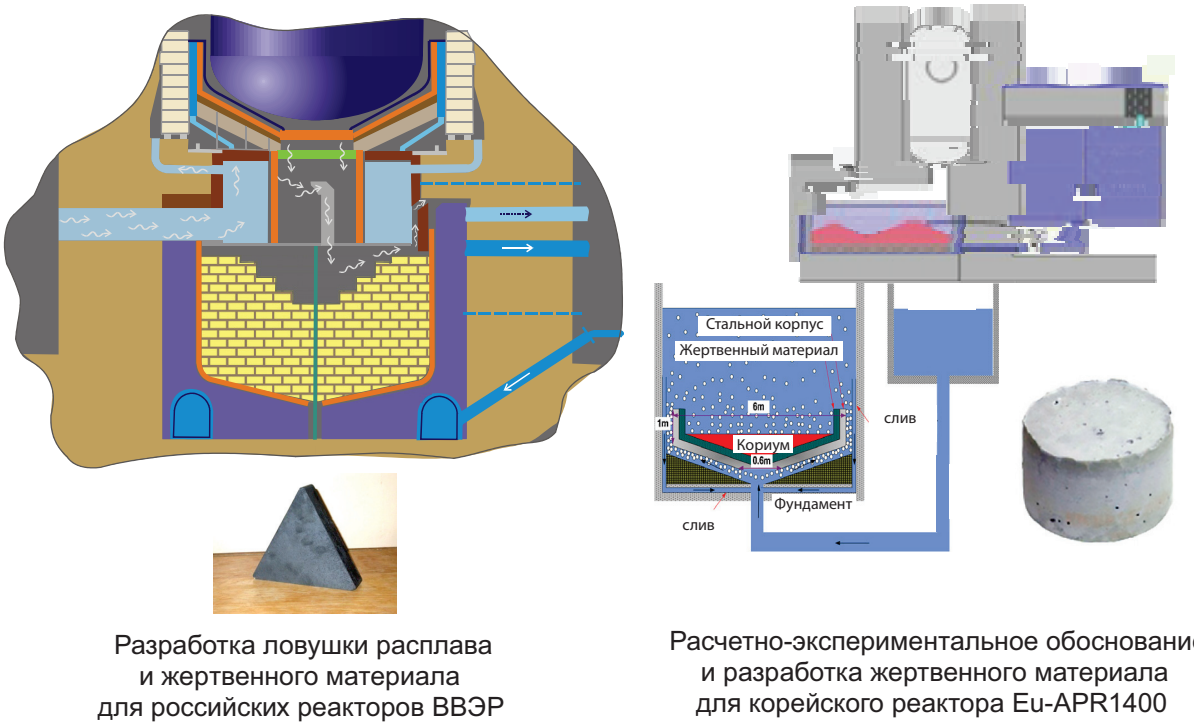


Рис. 3. Схемы устройств локализации расплава для проектов ВВЭР и Eu-APR1400

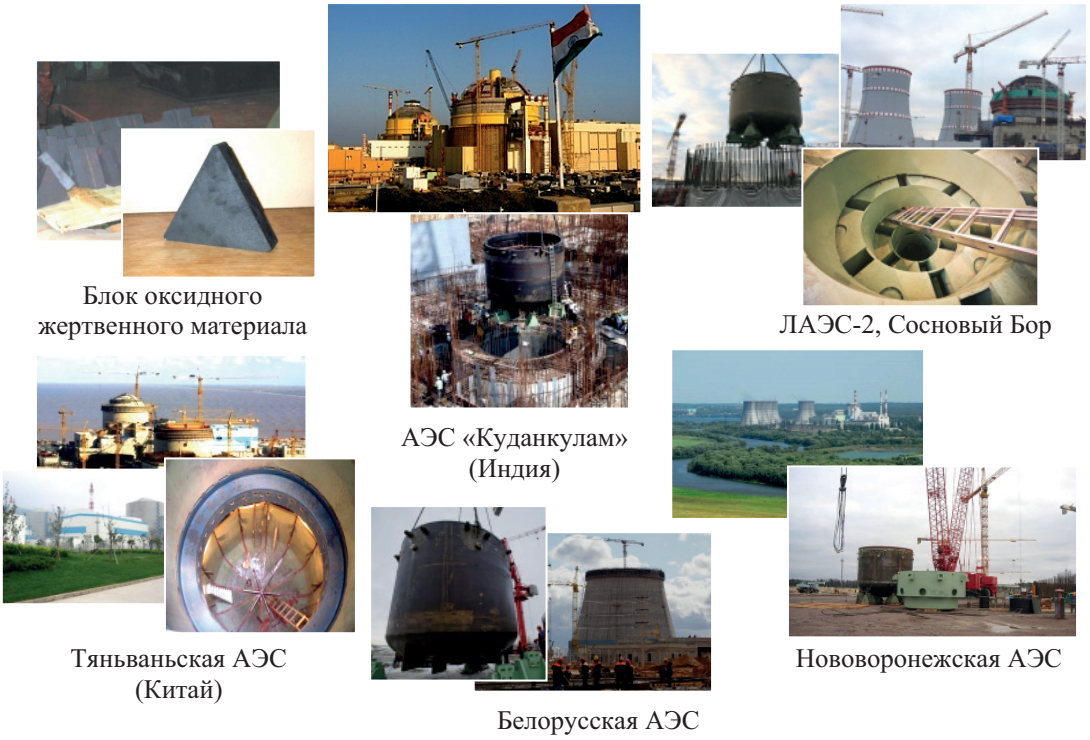


Рис. 4. Вид блока оксидного жертвенного материала и фотографии монтажа ловушек расплава на строящихся АЭС

<u>Направление II</u>. Экспериментально-расчётные исследования локальных физико-химических и теплогидравлических процессов в расплаве кориума применительно к обоснованию ловушек расплава:

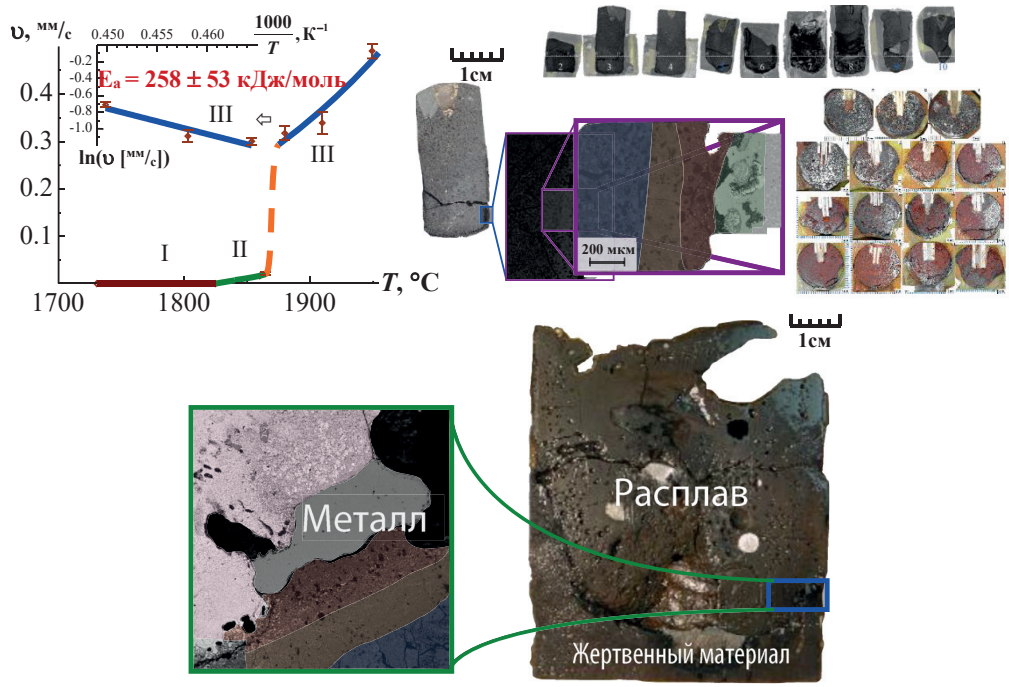
- разработан оксидно-металлический жертвенный материал на основе оксида железа (III) – оксида алюминия в комбинации с конструкционной сталью применительно к ловушке расплава для АЭС с ВВЭР;
- разработан оксидно-металлический жертвенный материал на основе гексаферрита стронция и высокоглиноземистого цемента в комбинации с конструкционной сталью применительно к ловушке расплава АЭС с реактором Eu-APR1400;
- определена кинетика взаимодействия оксидного расплава прототипного кориума с жертвенным материалом ловушки расплава АЭС с ВВЭР, разработана математическая модель их взаимодействия;
- определена кинетика взаимодействия металлической фазы расплава кориума, содержащего U и Zr, с жертвенным материалом ловушки расплава АЭС с ВВЭР и АЭС с Eu-APR1400, разработаны математические модели взаимодействия;
- исследовано взаимодействие расплава прототипного кориума с бетонами действующих АЭС с ВВЭР и огнеупорами, перспективными в качестве защитных материалов, определены характеристики взаимодействия;
- исследован выход газов, (включая водород), аэрозолей и продуктов деления в процессе формирования, стабилизации и кристаллизации ванны расплава;
- определены термодинамические характеристики ($T_{солидус}$, $T_{ликвидус}$ и др.) для многокомпонентной системы, включающей элементы ловушки расплава АЭС с ВВЭР и АЭС с BWR;

– определены теплогидравлические и физико-химические характеристики при подаче воды на поверхность ванны расплава прототипного кориума и на поверхность ванны металлического расплава, уточнена расчётная зависимость для коэффициента теплообмена;

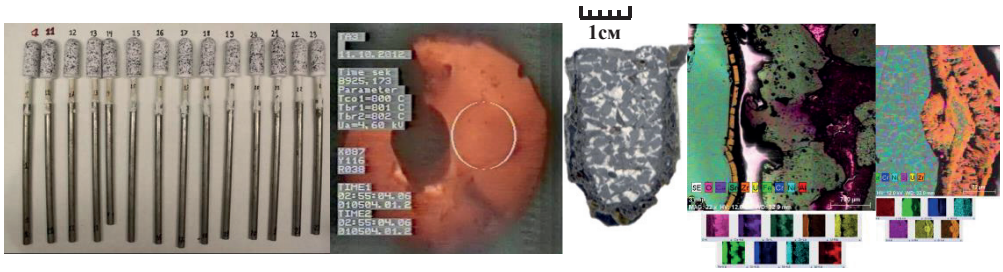
– исследован кризис теплообмена на наружной поверхности корпуса ловушки и корпуса реактора, разработана расчётная зависимость для определения критического теплового потока;

– разработан расчётный код CORCAT для моделирования теплогидравлических и физико-химических процессов взаимодействия в ловушке расплава.

Данные работы выполнялись на установках экспериментального комплекса «Расплав» и на теплогидравлических стендах ПЕТЛЯ и КЕДР в отделе теплофизических исследований ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова». Результаты экспериментальных исследований были использованы при создании расчётного кода CORCAT для моделирования теплогидравлических и физико-химических процессов взаимодействия в ловушке расплава и при обосновании работоспособности ловушек расплава. На рис. 5 приведены результаты исследования взаимодействия расплава активной зоны ядерного реактора с жертвенными материалами.



Исследование кинетики взаимодействия керамического жертвенного материала УЛР ВВЭР с металлической и оксидной составляющими расплава активной зоны



Исследование кинетики взаимодействия жертвенного материала УЛР Eu-APR1400 с металлической составляющей расплава активной зоны

Рис. 5. Исследование взаимодействия расплава активной зоны с жертвенными материалами

На рис. 6 представлен вид образца бетона тепловой защиты устройства локализации расплава до, в процессе и после проведения эксперимента по исследованию поведения бетона тепловой защиты при нагреве под воздействием теплового излучения.

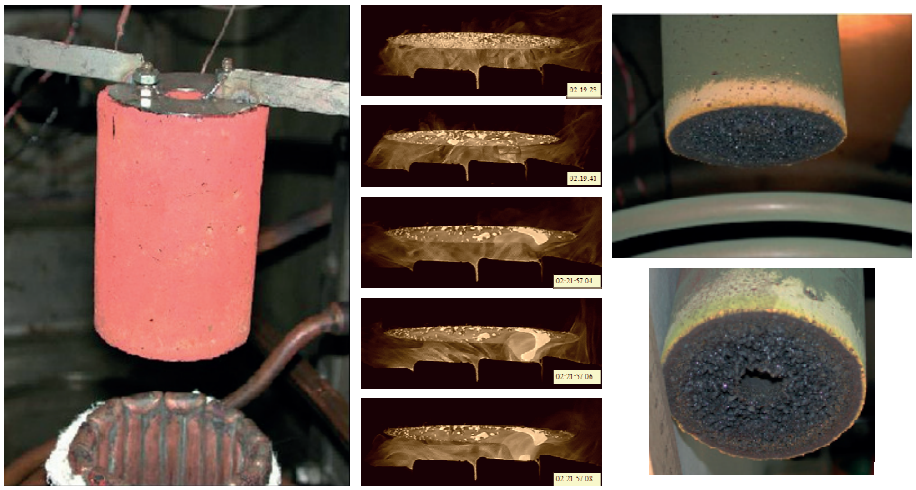


Рис. 6. Исследование функциональных свойств бетона тепловых защит

Направление III. Экспериментально-расчётные исследования локальных физико-химических процессов в расплаве прототипного кориума применительно к концепции удержания расплава в корпусе реактора:

- исследована кинетика и механизм взаимодействия расплава оксидного прототипного кориума с корпусной сталью реактора ВВЭР и европейских реакторов, разработаны расчётные зависимости для определения скорости и глубины коррозии стали (проекты МНТЦ № 833, № 833.1 «METCOR-1, 2» и № 3592 «METCOR-P»);
- исследована кинетика взаимодействия металлической фазы расплава кориума, содержащей U и Zr, с корпусной сталью реактора ВВЭР, разработаны расчётные зависимости (проект МНТЦ № 3592 «METCOR-P»);
- исследована кинетика, тепловые эффекты и выход газов при окислении расплава субокисленного оксидного прототипного кориума и металлической фазы расплава кориума, содержащей U и Zr, при замене нейтральной атмосферы над расплавом на окислительную, получены численные характеристики указанных процессов (проект МНТЦ № 3592 «METCOR-P»);
- исследованы фазовые диаграммы бинарных, трёхкомпонентных и многокомпонентных малоисследованных систем прототипного кориума, определены концентрационные зависимости температур ликвидус и солидус; координаты эвтектических точек, пределы растворимости компонентов в твердой фазе; составы сосуществующих жидкостей в куполе расслаивания; полученные результаты использованы для уточнения европейской базы данных по фазовым диаграммам NUCLEA и уточнения моделей в европейском термодинамическом расчётном коде GEMINI (проекты МНТЦ № 1950, № 1950.2 «CORPHAD-1, 2» и № 3813 «PRECOS», проект АЯЭ/ОЭСР TCOFF);
- исследованы распределение элементов между оксидными и металлическими слоями субокисленного расплава прототипного кориума, стратификация оксидных и металлических слоев в ванне расплава; обнаружена экстракция металлического U и Zr в расплав стали (эффект «MASCA») и инверсия в результате этого

эффекта оксидных и металлических слоев в ванне расплава (проект АЯЭ/ОЭСР «MASCA-1, 2» – головной исполнитель НИЦ «Курчатовский институт», соисполнитель – ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»);

– определено влияние окисления кориума на выход продуктов деления из ванны расплава прототипного кориума и определена морфология аэрозолей (проект МНТЦ № 3345 (EVAN) – головной исполнитель СПбАЭП, соисполнитель в части экспериментов с прототипным расплавом кориума – ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»);

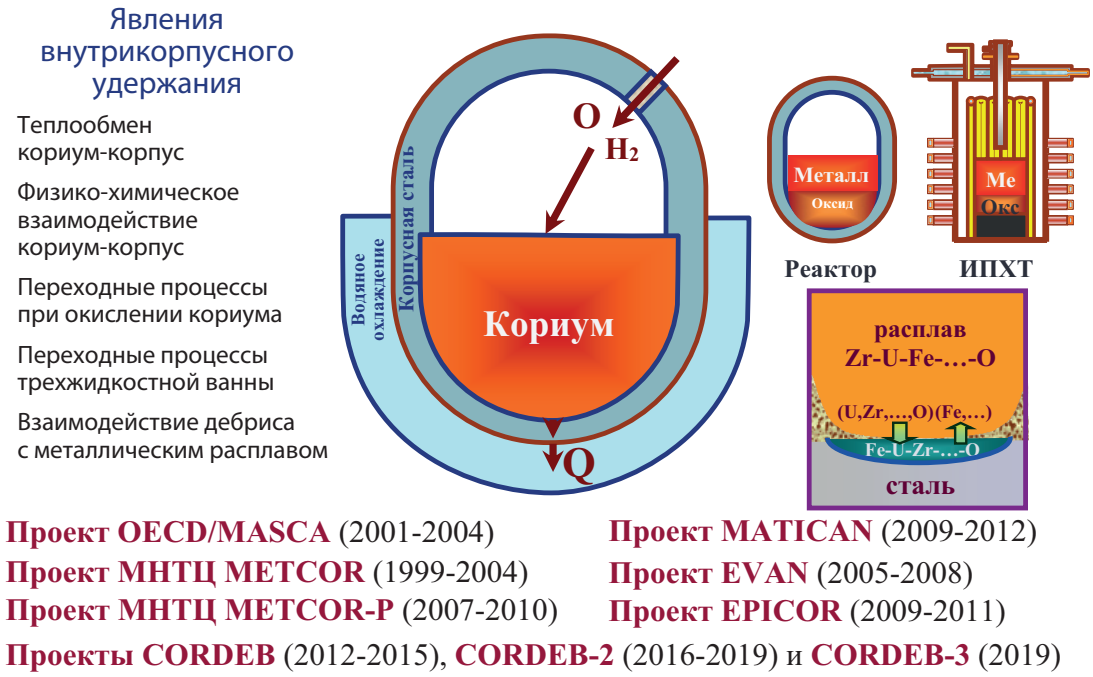
– определена температура ликвидус внекорпусного кориума для условий ловушки EPR 1600 (партнерский проект № 3837(LITEC) с CEA, Кадараш, Франция);

– определены температуры ликвидус для кориумных смесей, характерных для реактора CANDU, проведено экспериментальное исследование расслоения кориумных смесей и определены условия существования расслоения, определена кинетика взаимодействия расплава кориума с корпусной сталью каландра (партнерский проект № 3938 (MATICAN) с AECL, Канада);

– исследовано распределение элементов и инверсия слоев оксидов и металла в расплаве кориума реактора BWR (KERENA), определено влияние бора и углерода на распределение элементов и инверсию слоев (партнерский проект № 4012 (EPICOR) с AREVA NP GmbH, Германия);

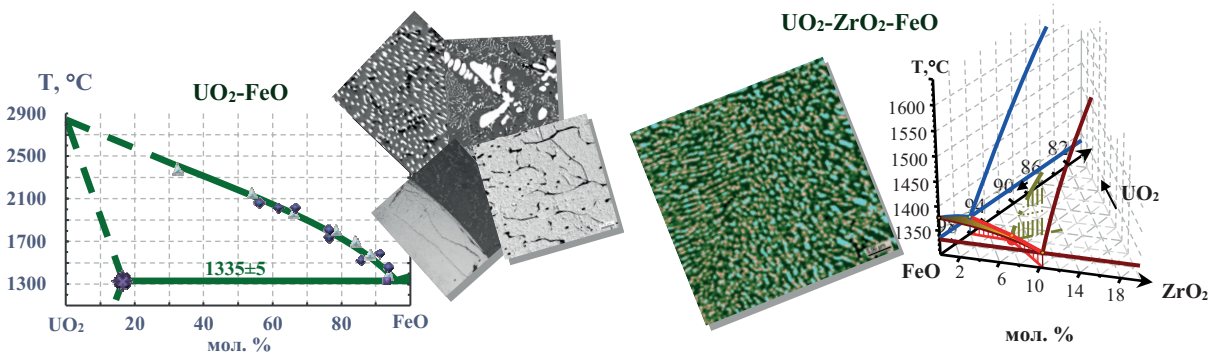
– исследована трансформация трёхслойной структуры ванны расплава кориума, процессы окисления, процессы взаимодействия дебриса с металлическим расплавом (контракты CORDEB, CORDEB2 и CORDEB3 с IRSN, Франция).

Все работы по данному направлению выполнены по контрактам с зарубежными заказчиками. Получены новые уникальные результаты, которые актуальны для обоснования концепции удержания расплава в корпусе реактора для новых проектов российских АЭС. Примеры исследованных систем и экспериментальных результатов по взаимодействию расплава активной зоны с внутрикорпусными конструкциями приведены на рис. 7–11.



Проект OECD/MASCA (2001-2004)
Проект МНТЦ METCOR (1999-2004)
Проект МНТЦ METCOR-P (2007-2010)
Проект MATICAN (2009-2012)
Проект EVAN (2005-2008)
Проект EPICOR (2009-2011)
Проекты CORDEB (2012-2015), **CORDEB-2** (2016-2019) и **CORDEB-3** (2019)

Рис. 7. Проекты, направленные на решение проблем внутрикорпусного удержания кориума



Экспериментальное построение и термодинамическая оптимизация фазовых диаграмм

Проект ENTHALPY (2001-2003)
UO_2-ZrO_2-FeO-SiO_2-Cr_2O_3-CaO-Al_2O_3

Проект АЯЭ/ОЭСР MASCA (2001-2007)
U-Zr-Fe-(Cr-Ni-FP)-O

Проект МНТЦ CORPHAD (2003-2006)
ZrO_2-FeO UO_2-FeO UO_2-SiO_2
FeO-UO_2-ZrO_2 Fe_2O_3-UO_{2+x}-ZrO_2
$Fe_2O_3(Fe_3O_4)$-SiO_2
U-Zr-O U-Fe-O Zr-Fe-O

Проект МНТЦ PRECOS (2008-2011)
UO_2-SiO_2 UO_2-CaO
ZrO_2-$Fe_2O_3(Fe_3O_4)$
UO_2-FeO-SiO_2 ZrO_2-FeO-SiO_2
UO_2-FeO-CaO ZrO_2-FeO-CaO
U-Zr-Fe-O

NUCLEA

Проект АЯЭ/ОЭСР TCOFF (2017-2019)
U-Zr-Fe-O-B-C

Рис. 8. Проекты, направленные на исследование фазовых равновесий в кориумных системах и перечень исследованных систем

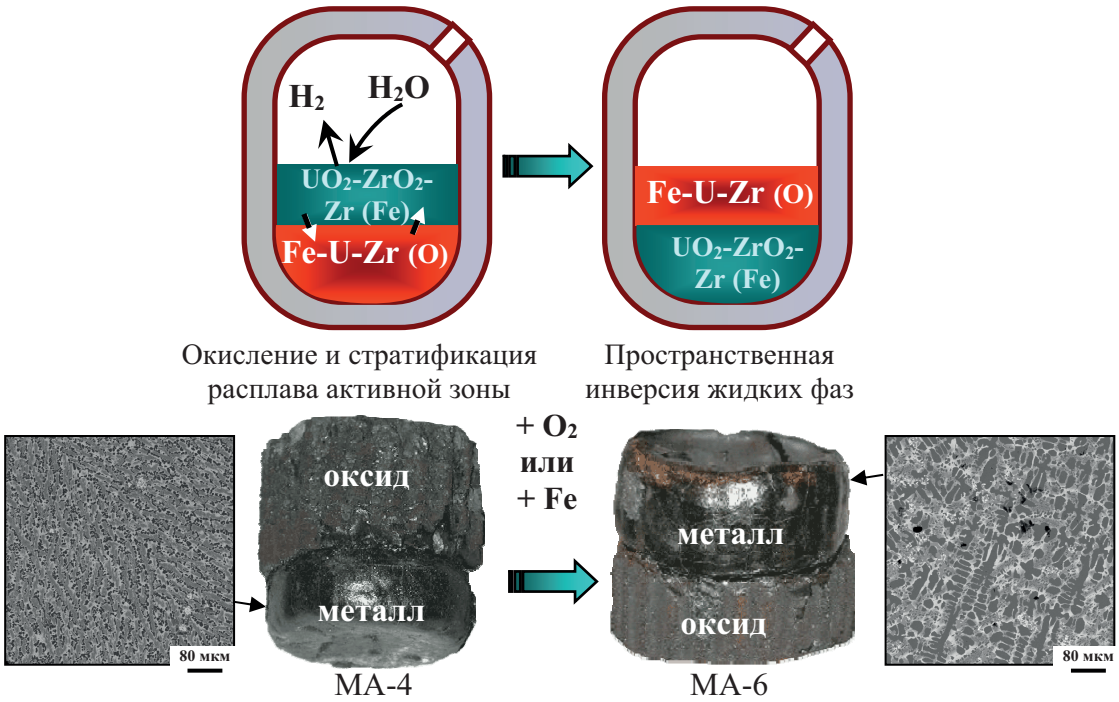
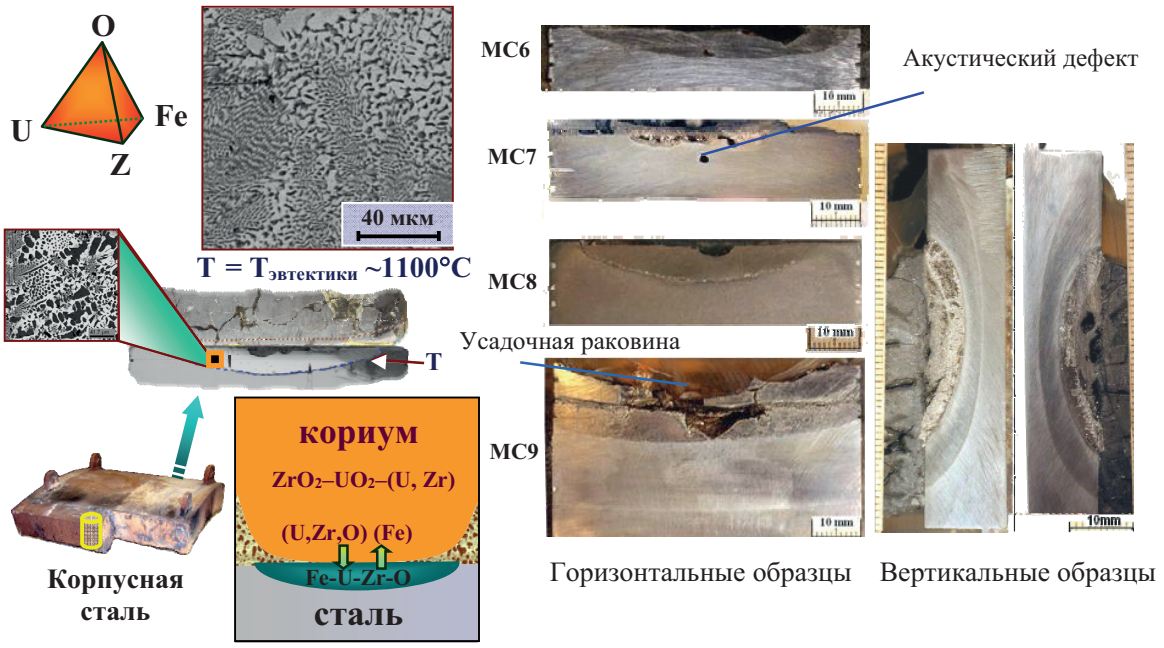
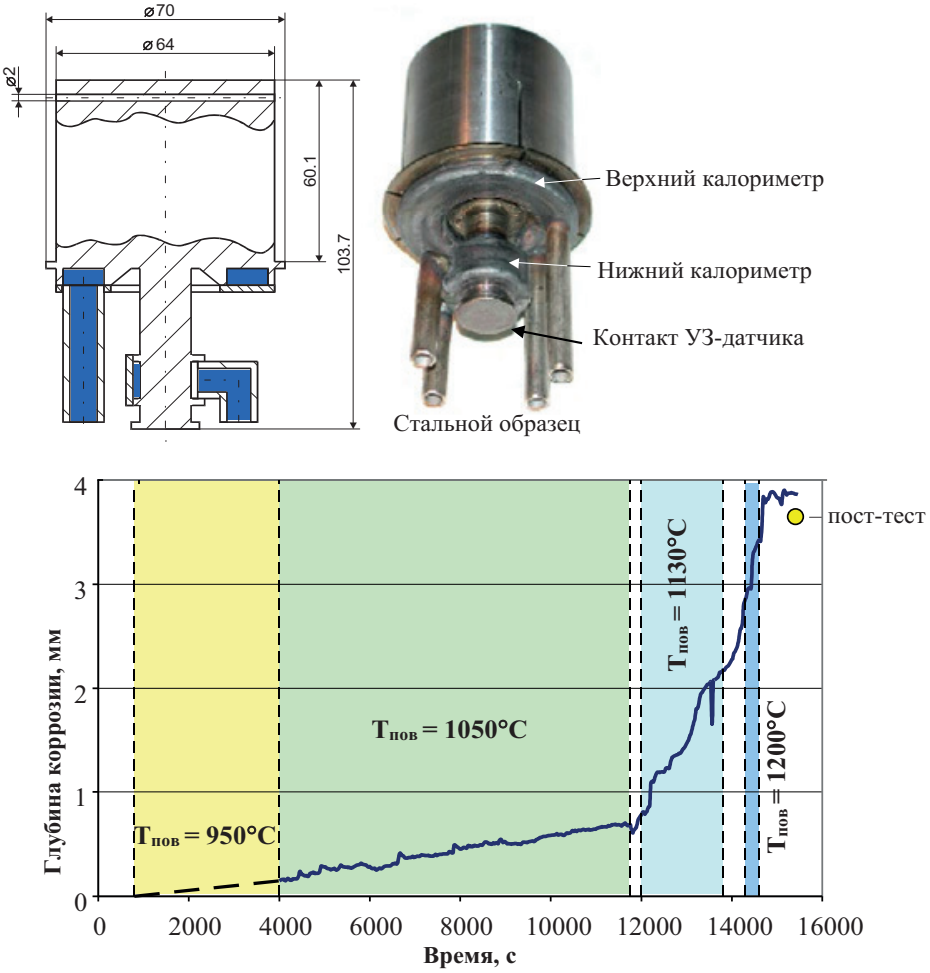


Рис. 9. Результаты экспериментов проекта MASCA



Исследование коррозии при взаимодействии с субокисленным расплавом кориума



Исследование коррозии стального образца в контакте с расплавом UO_{2+x} – ZrO_2 – FeO_y по данным ультразвукового он-лайн исследования

Рис. 10. Результаты экспериментов проектов METCOR и METCOR-P

Направление IV. Экспериментально-расчётные исследования локальных физико-химических процессов в расплаве прототипного кориума на внекорпусной стадии развития тяжёлой аварии.

В рамках международного проекта АЯЭ/ОЭСР TCOFF (термодинамическое описание топливных осколков и продуктов деления на основе анализа сценария развития тяжёлой аварии на АЭС Фукусима-Дайичи) в 2017–2018 годах выполнена серия интегральных экспериментов, основной целью которых стало исследование процесса кристаллизации расплава системы «кориум-бетон» для условий, соответствующих различным конструкциям реакторов – ВВЭР и PWR (рис. 11).

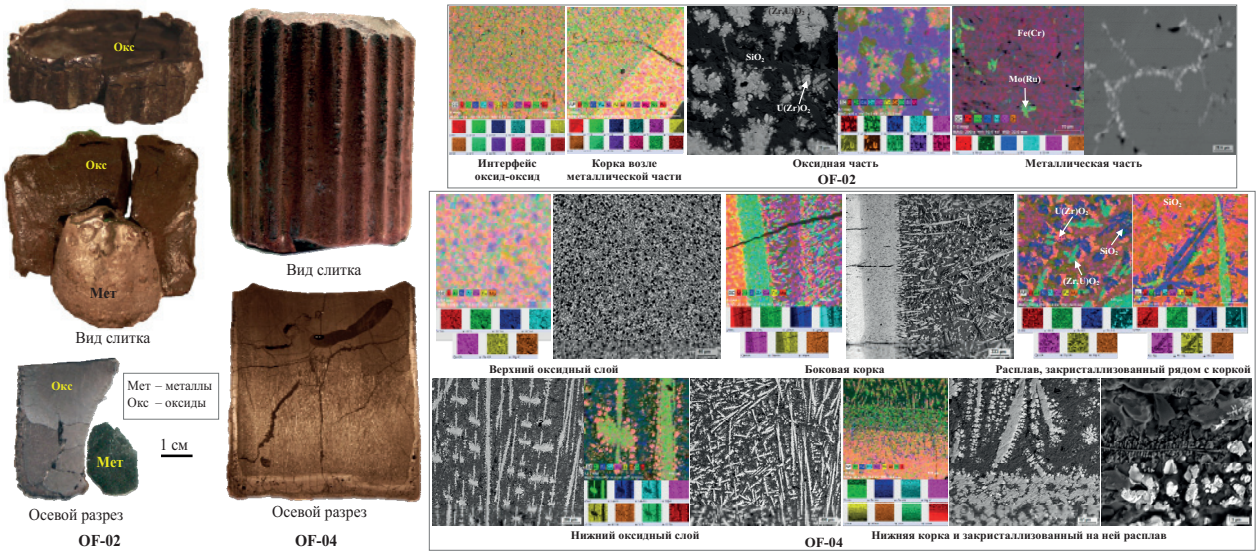


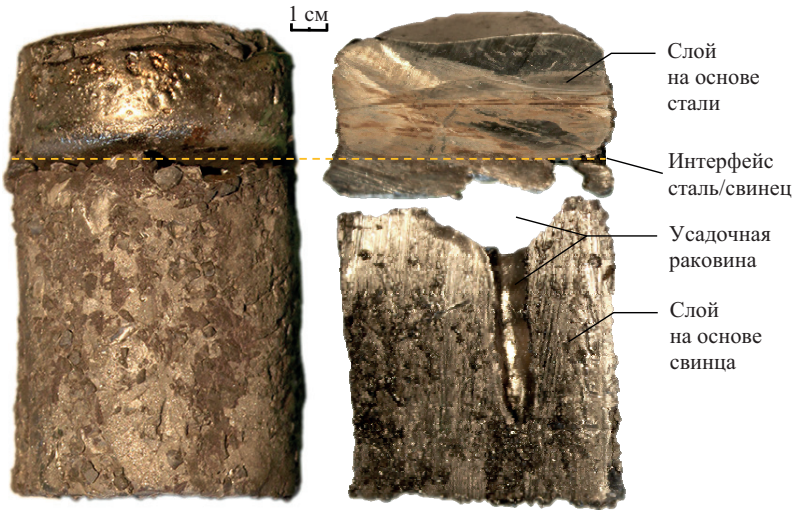
Рис. 11. Результаты экспериментов серии OF проекта TCOFF

В рамках международного проекта АО «Техснабэкспорт» с Mitsubishi Research Institute «Кориум-2» (Разработка технологии анализа и оценки для определения характеристик топливного дебриса) по заказу АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» в 2019–2020 годах изготовлена, охарактеризована и поставлена заказчику серия образцов модельного дебриса, прототипного условиям аварийного блока АЭС Фукусима-Дайичи (рис. 12).

Рис. 12. Вид образцов модельного топливного дебриса проекта Кориум-2

Направление V. Экспериментально-расчётные исследования локальных физико-химических процессов в перспективных реакторах.

В рамках данного направления в 2019–2020 годах по заказу ИБРАЭ РАН выполнена разработка программы экспериментальных исследований процессов, протекающих при гипотетических авариях с расплавлением активной зоны реактора со свинцовым теплоносителем, и проведено четыре серии экспериментов, реализующих часть разработанной программы (рис. 13).



Общий вид слитка

Аксиальный разрез слитка

Рис. 13. Вид слитка, полученного в эксперименте по исследованию взаимодействия расплава теплоносителя с расплавом стали оболочек твэлов

Направление VI. Отработка технологии остекловывания РАО методом индукционной плавки в холодном тигле.

В настоящее время одним из надежных и востребованных способов утилизации радиоактивных отходов (РАО) является их остекловывание, то есть включение РАО в структуру стекол. Работы по отработке технологии одностадийного остекловывания РАО методом индукционной плавки в холодном тигле начали проводиться ОИТА с 2010 года совместно с лабораторией ИПХТ кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и АО «Радиевым институтом им. В.Г. Хлопина». Основаниями для начала отработки технологии остекловывания РАО явились следующие причины:

1. Перспективность применения данного метода иммобилизации радиоактивных отходов, положительный опыт использования остекловывания РАО за рубежом (особенно во Франции) и недостаточный объём опыта применения технологии остекловывания РАО в России.
2. Необходимость эффективной переработки РАО, образующихся в результате деятельности ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».
3. Большой опыт применения индукционной техники для плавления различных материалов методом индукционной плавки в холодных тиглях различных конструкций.

По данному направлению в ОИТА ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» выполнены следующие работы:

– для отработки технологии одностадийного остекловывания РАО испытаны различные конструкции плавителей. В результате был спроектирован и изготовлен

плавитель с холодным тиглем большого диаметра с применением низкой частоты индуктора. Испытание плавителя при синтезе фосфатного стекла показало его эффективность;

– для переработки РАО, образующихся в результате деятельности ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», подобрана рецептура стекла и проведена его оптимизация. Проведены эксперименты по синтезу стекломатрицы с натурным РАО. Содержание концентрата в стекломатрице в перерасчёте на сухой остаток составило до 30 масс. %. Скорость выщелачивания радионуклидов составила ~10^{-5} г/(см^2·сут), что соответствует требованиям к химической устойчивости остеклованных высокоактивных отходов;

– обосновано предложение о сооружении на базе экспериментального комплекса «Расплав» установки остекловывания, предназначенной для отработки конструкции индукционной печи, технологии остекловывания концентрата ЖРО и её последующего воплощения в опытно-промышленную установку.

На рис. 14 приведены этапы работы по отработке одностадийной технологии остекловывания РАО на установке «Расплав-Стекло».

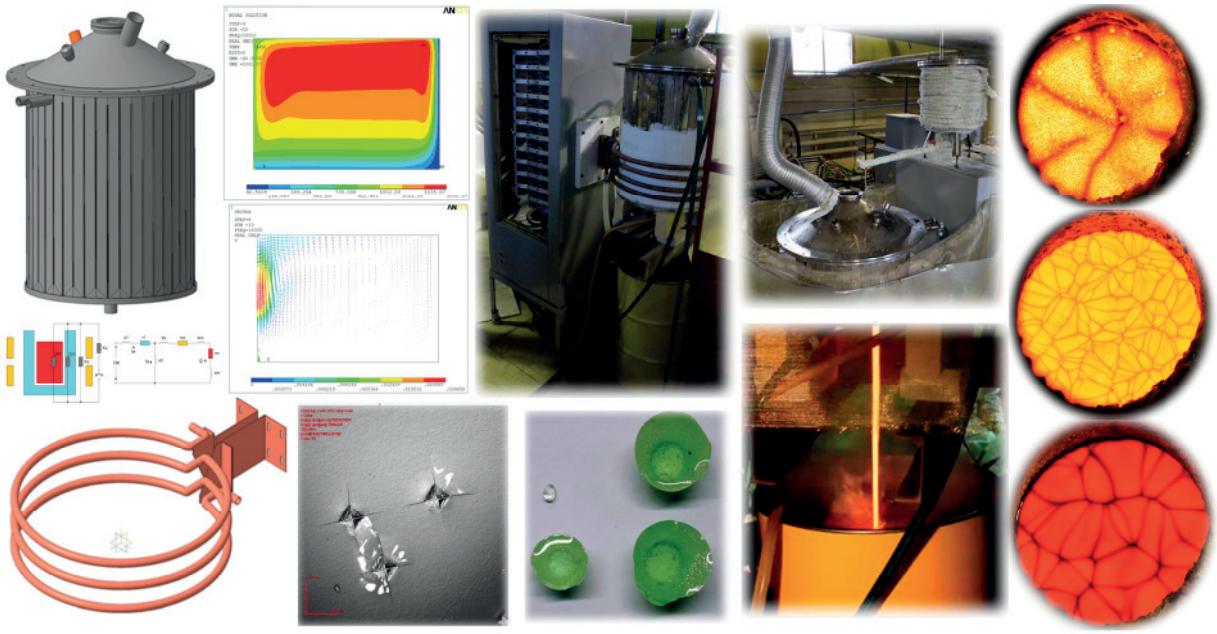


Рис. 14. Реализация одностадийной технологии остекловывания РАО

<u>Направление VII</u>. Разработка и исследование материалов и технологий для безопасности АЭС. По данному направлению:

1. В ОИТА совместно со специалистами ИХС РАН разработаны физико-химические основы создания нового класса материалов – жертвенных материалов системы безопасности АЭС. Проведена разработка и экспериментальное обоснование функциональных характеристик оксидных керамических жертвенных материалов для устройства локализации расплава реакторов ВВЭР большой мощности, а также жертвенных материалов для АЭС Eu-APR1400.

2. Разработанная в СПбГТУ (ТИ) совместно со специалистами ОИТА ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» технология получения нанокомпозиционных катализаторов, со-

стоящих из наночастиц ZrO_2, диспергированных в матрице рентгеноаморфного Al_2O_3, которые используются в регенераторах водорода, применяемых для обеспечения водородной безопасности при тяжёлых авариях, позволяет повысить эксплуатационные характеристики катализаторов по сравнению с существующими аналогами на основе Pt/Pd (активность, селективность, термостабильность) и расширить диапазон рабочих температур.

3. По договору с СПбАЭП были проведены лабораторные испытания ячейки рекомбинатора водорода с разработанным катализатором, которые подтвердили хорошие характеристики разработанного катализатора. Основные результаты испытаний приведены на рис. 15. В ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» в отделе теплофизических исследований функционирует стенд для испытания существующих рекомбинаторов, который позволяет проводить исследования и отработку рекомбинаторов с новым типом катализаторов.

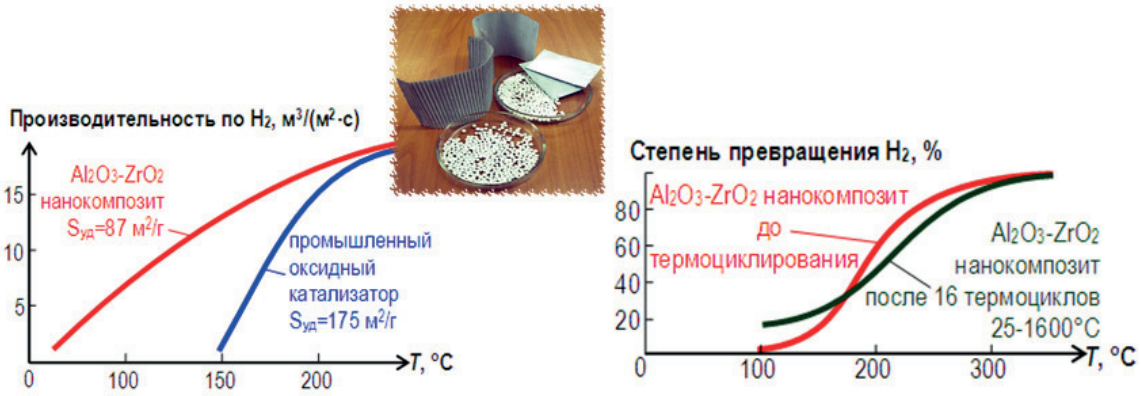


Рис. 15. Разработка нанокомпозиционных оксидных катализаторов рекомбинации водорода

4. Совместно со специалистами ОАО «НПО ЦКТИ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и СПбПУ проведено исследование влияния оксидных наночастиц на критический тепловой поток при кипении их водной дисперсии. Потенциально развитие этой технологии может существенно увеличить запас до кризиса кипения теплоносителя.

5. Проведены исследования по разработке нового вида топлива с ультрадисперсной структурой на основе системы UO_2-SiO_2. Отработана технология выщелачивания аморфной матрицы, позволяющая повысить концентрацию делящегося материала при сохранении микроструктурных особенностей топлива. Продемонстрирована возможность замены аморфной матрицы на металлическую. Показано, что выгорающий поглотитель сокристаллизуется с делящимся материалом и имеет однородное распределение по объёму, а полученный топливный материал обладает устойчивостью к агрегации и росту керамического наполнителя, субмикронный размер которого обеспечивает повышенную устойчивость к распуханию и повышенную способность к локализации газообразных продуктов деления в топливном материале. При этом аморфная матрица должна обеспечивать удобство иммобилизации радиоактивных отходов на этапах хранения отработавших тепловыделяющих элементов, переработки и регенерации топлива, захоронения радиоактивных отходов, а также устойчивость топлива в химически агрессивных средах.

Выполняемые в ОИТА исследования ведутся в тесном сотрудничестве со многими российскими и зарубежными организациями, логотипы некоторых из них приведены на рис. 16.

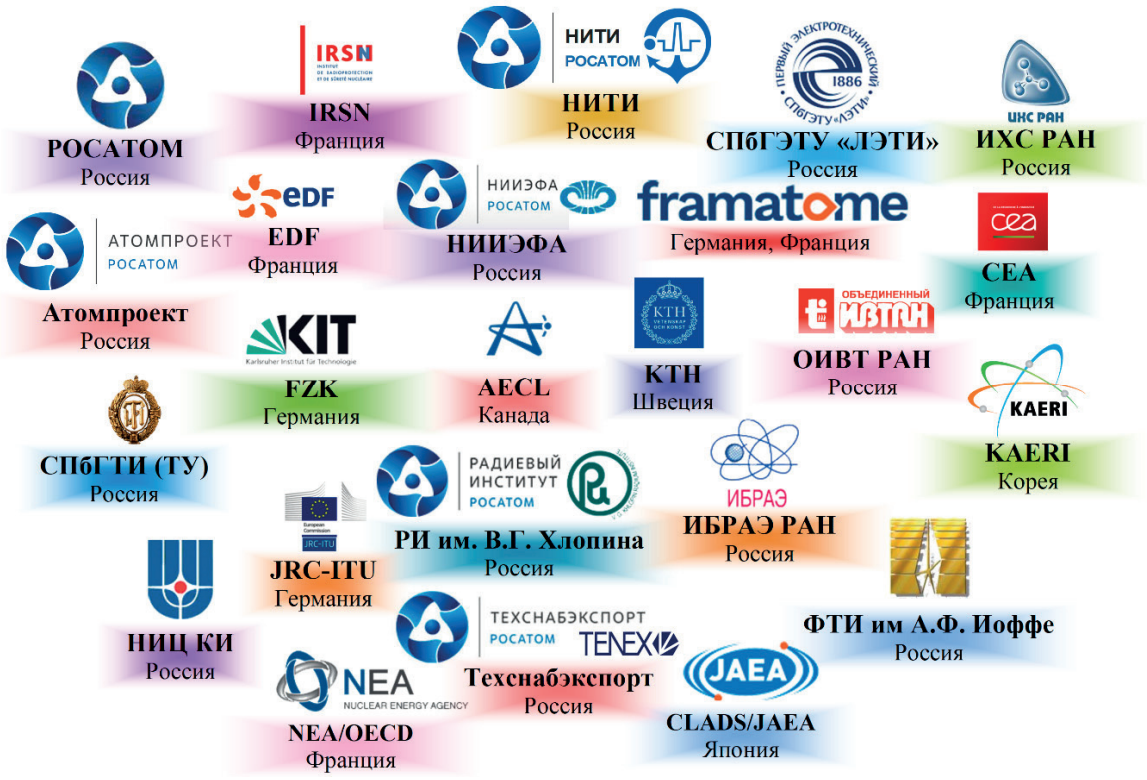


Рис. 16. Сотрудничество ОИТА ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» с российскими и международными организациями в области обеспечения безопасности АЭС

Заключение

За более чем тридцатилетнюю историю деятельности отделом исследований тяжёлых аварий НИТИ выполнен комплекс экспериментальных и расчётных работ по исследованию тяжёлоаварийных процессов АЭС, которые охватывают практически все аспекты тяжёлых аварий. В процессе выполнения работ были открыты и исследованы явления, имеющие принципиальное значение для понимания тяжёлоаварийных процессов АЭС.

Полученные ОИТА научные результаты получили широкое признание в России и за рубежом и используются мировыми научными центрами при обосновании безопасности для действующих и проектируемых АЭС.

Литература

1. *Петров Ю.Б.* Индукционная плавка окислов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 104 с.
2. *Лопух Д.Б.* Современные направления и новые результаты исследований ИПХТ / Д.Б. Лопух // Индукционный нагрев. – 2008. – N6. – С. 27–37.
3. Индукционная плавка кориума в холодном тигле. Оборудование и применение / Д.Б. Лопух [и др.]. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. – 172 с.
4. Direct numerical simulation of molten corium pool inductively heated in the cold crucible/ S.A. Smirnov [et al.] // OECD/NEA MASCA2 Seminar 2007, Cadarache, France, 11–12 October 2007. – 2007. – P. 3–8.
5. Oxidation kinetics of corium pool / A.A. Sulatsky [et al.] // Nucl. Eng. Des. – 2013. – V. 262.– P. 168–179.

6. Методические особенности обоснования пассивных систем безопасности АЭС с ВВЭР-640 / А.М. Афров [и др.] // Теплоэнергетика. – 1996. – № 11. – С. 16–21.

7. Анализ возможности удержания расплава кориума в корпусе ВВЭР при тяжёлой аварии с разрушением активной зоны / В.Ф. Рогов [и др.] // Теплоэнергетика. – 1996. – № 11. – С. 12–15.

8. *Бешта С.В.* Исследование взаимодействия расплава UO_{2+x}-ZrO_2-Fe(Ni, Cr)O_y с бетонами на основе ZrO_2 / С.В. Бешта, В.К. Хабенский, Е.В. Крушинов // Огнеупоры и керамика. – 2000. – № 1. – С. 28–32.

9. Использование огнеупорных покрытий в устройствах локализации расплава при тяжёлой аварии на АЭС с ВВЭР / В.Н. Минеев [и др.] // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89, вып. 5. – С. 350–355.

10. Water Boiling on the Corium Melt Surface under VVER Severe Accident Conditions / S.V. Bechta [et al.] // NED. – 2000. – 195(1). – P. 49–56.

11. Кипение воды на поверхности расплава кориума в условиях тяжёлой аварии / С.В. Бешта [и др.] // Теплоэнергетика. – 1998. – № 11. – С. 20–24.

12. Experimental studies of oxidic molten corium – vessel steel interaction / S.V. Bechta [et al.] // NED. – 2001. – 210. – P. 193–224.

13. Устройство локализации расплава Тяньваньской АЭС с ВВЭР-1000 / А.С. Сидоров [и др.] // Теплоэнергетика. – 2001. – Т. 48, № 9. – С.8–13.

14. Жертвенные материалы системы безопасности атомных электростанций – новый класс функциональных материалов / *В.В. Гусаров* [и др.] // Теплоэнергетика. – 2001. – Т. 48, № 9. – С. 22–24.

15. Экспериментальное исследование процессов, возникающих при подаче воды на расплав стали / Д.Б. Лопух [и др.] // Теплоэнергетика. – 2001. – № 9. – С. 25–31.

16. Физико-химическое моделирование и анализ процессов взаимодействия расплава активной зоны ядерного реактора с жертвенным материалом / В.В. Гусаров [и др.] // Физ. и хим. стекла. – 2005. – Т. 31, № 1. – С. 71–90.

17. Новый класс функциональных материалов для устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактора / В.В. Гусаров [и др.] // Рос. хим. ж. – 2005. – Т. XLIX, № 4. – С. 42–53.

18. Corrosion of vessel steel during its interaction with molten corium. Part 1: Experimental / S.V. Bechta [et al.] // NED. – 2006. – V. 236. – P. 1810–1829.

19. Corrosion of vessel steel during its interaction with molten corium. Part 2: Model development / S.V. Bechta [et al.] // NED. – 2006. – 236. – P. 1362–1370.

20. Распределение компонентов между несмешивающимися расплавами в условиях неизотермичности системы / В.В. Гусаров [и др.] // Физ. и хим. стекла. – 2006. – Т. 32, № 6. – С. 875–882.

21. Фазовые и химические превращения в системе SiO_2-Fe_2O_3(Fe_3O_4) при различных парциальных давлениях кислорода / Л.П. Мезенцева [и др.] // Журнал неорганической химии. – 2006. – Т. 51, № 1. – С. 126–133.

22. Phase diagram of the ZrO_2-FeO system / S.V. Bechta [et al.] // JNM. – 2006. – V. 348. – P. 114–121.

23. Фазовые превращения в бинарном разрезе системы UO_2-FeO-Fe /С.В. Бешта [и др.] // Радиохимия. – 2007. – Т. 49, № 1. – С. 20–24.

24. Физико-химическое моделирование горения материалов с суммарным эндотермическим эффектом / В.В. Гусаров [и др.] // Физика и химия стекла. – 2007. – Т. 33, N 5. – С. 678–685.

25. Взаимодействие материала на основе оксидов алюминия и железа с расплавом металлов / В.В. Гусаров [и др.] // Журн. прикл. химии. – 2007. – Т. 80, вып. 4. – С. 541–548.

26. Phase diagram of the UO_2–FeO_{1+x} system / S.V. Bechta [et al.] // JNM. – 2007. – V. 362 (1). – P . 46–52.

27. Corium phase equilibria based on MASCA, METCOR and CORPHAD results / S.V. Bechta [et al.] // NED. – 2008. – V. 238. – P. 2761–2771.

28. Severe accident management concept of the VVER-1000 and the justification of corium retention in a crucible-type core catcher / V.B. Khabensky, V.S. Granovsky, S.V. Bechta, V.V. Gusarov // Nucl. Eng. and Technol. – 2009. – V. 41, № 5. – P. 561–574.

29. VVER vessel steel corrosion at interaction with molten corium in oxidizing atmosphere / S.V. Bechta [et al.] // NED. – 2009. – V. 239. – P. 1103–1112.

30. Eutectic crystallization in the $FeO_{1.5}$-UO_{2+x}-ZrO_2 system / V.I. Almjashev [et al.] // JNM. – 2009. – V. 389. – P. 52–56.

31. Взаимодействие расплава активной зоны ядерного реактора с оксидным жертвенным материалом устройства локализации для АЭС с ВВЭР / В.Г. Асмолов [и др.] // ТВТ. – 2007. – Т. 45, N1. – С. 28–37.

32. Термическая устойчивость и каталитическая активность композита аморфный Al_2O_3-нанокристаллы ZrO_2 / О.В. Альмяшева, Е.А. Власов, В.Б. Хабенский, В.В. Гусаров // ЖПХ. – 2009. – Т. 82, № 2. – С. 224–229.

33. Phase equilibria in the FeO_{1+x}-UO_2-ZrO_2 system in the FeO_{1+x}-enriched domain / V.I. Almjashev [et al.] // JNM. – 2010. – V. 400. – P. 119–126.

34. Interaction between Molten Corium UO_{2+x}-ZrO_2-FeO_y and VVER Vessel Steel / S.V. Bechta [et al.] // JNT. – 2010. – V. 170. – P. 210–218.

35. Influence of corium oxidation on fission product release from molten pool / S.V. Bechta [et al.] // NED. – 2010. – V. 240. – P. 1229–1241.

36. Функционирование теплозащитных экранов устройства локализации расплава АЭС с ВВЭР / В.Б. Хабенский [и др.]// Теплоэнергетика. – 2011. – № 4. – С. 37–42.

37. Тройные эвтектики в системах FeO-UO_2-ZrO_2 и Fe_2O_3-U_3O_8-ZrO_2 / В.И. Альмяшев [и др.] // Радиохимия. – 2011. – Т. 53, № 1. – С. 14–19.

38. Формирование ванны расплава активной зоны ядерного реактора в ловушке тигельного типа АЭС с ВВЭР / С.В. Бешта [и др.] // Теплоэнергетика. – 2011. – № 5. С. 61–65.

39. Severe accident research in the core degradation area: An example of effective international cooperation between the European Union (EU) and the Commonwealth of Independent States (CIS) by the International Science and Technology Center / D. Bottomley [et al.] // NED. – 2012. – V. 252. – P. 226–241.

40. Oxidation kinetics of corium pool / A.A. Sulatsky [et al.] // NED. – 2013. – V. 262. – P. 169–179.

41. Quality improvements of thermodynamic data applied to corium interactions for severe accident modelling in SARNET2 / S. Bakardjieva [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2014. – V. 74. – P. 110–124.

42. Oxidation effect on steel corrosion and thermal loads during corium melt in-vessel retention / V.S. Granovsky [et al.] // NED. – 2014. – V. 278. – P. 310–316.

43. New sacrificial material for ex-vessel core catcher / A.A. Komlev [et al.] // JNM. – 2015. – V. 467. – P. 778–784.

44. Oxidation effects during corium melt in-vessel retention / V.I. Almjashev [et al.] // NED. – 2016. – V. 305. – P. 389–399.

45. Исследование физико-химических, теплофизических и механических характеристик серпентинитового бетона шахты реактора АЭС и процессов его взаимодействия с расплавом кориума / В.Б. Хабенский [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2017. – № 1 (7). – С. 56–74.

46. Экспериментальное исследование процессов окисления расплава кориума в корпусе реактора / В.И. Альмяшев [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2017. – № 4 (10). – С. 59–84.

47. Экспериментальное исследование фазообразования в системе UO_2-SiO_2 / В.И. Альмяшев [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2017. – № 3 (9). – С. 50–70.

48. Effect of temperature gradient on chemical element partitioning in corium pool during in-vessel retention / V.B. Khabensky [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2018. – V. 327. – P. 82–91.

49. Experimental study of transient phenomena in the three-liquid oxidic-metallic corium pool / V.I. Almjashev [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2018. – V. 332. – P. 31–37.

50. Способ изготовления ядерного топлива: патент РФ № 2651799 / В.И. Альмяшев [и др.]. – Приоритет от 09.08.2017. Дата публикации – 27.04.2018.

51. Experimental study of oxidic-metallic melt oxidation / A.A. Sulatsky [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2020. – V. 363. – Art. 110618.

52. Моделирование окисления расплава активной зоны ядерного реактора при наличии оксидной корки на поверхности расплава / В.Б. Хабенский [и др.] // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91, вып. 2. – С. 232–239.

53. Альмяшев В.И. Анализ устойчивости $USiO_4$ / В.И. Альмяшев, В.В. Гусаров, В.Б. Хабенский // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2020. – № 2 (20). – С. 80–97.

54. Исследование выхода продуктов деления из расплава кориума / С.Б. Бешта [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2020. – № 1 (19). – С. 54–73.

55. Математическая модель окисления расплава кориума с поверхностной оксидной коркой / *В.Б. Хабенский* [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2019. – № 3 (17). – С. 50–55.

56. Жертвенный материал для ловушки расплава на основе высокоглиноземистого цемента и керамического наполнителя /А.А. Комлев [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2019. – № 2 (16). – С. 52–70.

57. Экспериментальное исследование влияния структуры ванны расплава и поверхностной корки на кинетику окисления кориума / А.А.Сулацкий [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2019. – № 1 (15). – С. 66–80.

58. Взаимодействие металлического расплава двухжидкостного кориума с корпусной сталью / А.А.Сулацкий [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 4. – С. 1–11.

59. Взаимодействие металлического расплава, содержащего цирконий и уран, с бетонным жертвенным материалом / В.Б. Хабенский [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2018. – № 3 (13). – С. 53–72.

60. Влияние термоградиентных условий на физико-химическое взаимодействие расплава субокисленного кориума и корпусной стали при удержании расплава в корпусе реактора / В.Б. Хабенский [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2018. – № 2 (12). – С. 42–65.

61. Экспериментальное исследование влияния на критический тепловой поток слоя из наночастиц, формирующегося при кипении ZrO_2/H_2O наножидкости / В.Б. Хабенский [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2018, № 1 (11). – С.55–69.

62. Experimental studies of impact on a critical heat flux the parameters of nanoparticle layer formed at nanofluid boiling / V.B. Khabensky [et al.] // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. – 2018. – V. 9, № 2. – P. 279–289.