

*На правах рукописи*



**ЖДАНОВ**  
**Владимир Семенович**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ  
С МАТЕРИАЛАМИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ  
В ПРОБЛЕМЕ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ ВВЭР**

Специальность 05.14.03 – "Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации"

**Автореферат**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**г. Санкт-Петербург – 2008**

Работа выполнена в Дочернем государственном предприятии "Институт атомной энергии" Республиканского государственного предприятия "Национальный ядерный центр Республики Казахстан".

Научный руководитель:

– доктор техн. наук

*Бешта Севостьян Викторович*

Официальные оппоненты:

– доктор техн. наук, профессор

засл. деятель науки РФ

*Гусев Леонид Борисович*

– кандидат техн. наук, доцент

*Сулацкий Андрей Анатольевич*

Ведущая организация: *ФГУП "Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Атомэнергопроект"*

Защита диссертации состоится 28 октября 2008 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29  
в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " сентября 2008 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)5526552

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета

*К.А.Григорьев*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Деятельность в области повышения безопасности атомной энергетики на современном этапе можно условно разделить на два главных предметно-ориентированных направления:

- разработка систем безопасности проектируемых АЭС;
- повышение эффективности систем безопасности для действующих АЭС.

Несмотря на существующие глубоко эшелонированные системы безопасности реакторных установок АЭС все еще существует возможность маловероятного события, которое может привести к плавлению активной зоны реактора с перемещением расплава на днище силового корпуса ВВЭР и/или даже за его пределы. Такая авария по принятой в практике проектирования терминологии является запроектной. Т. е. она вызвана не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождается дополнительными, по сравнению с проектными авариями, отказами систем безопасности сверх единичного отказа или реализацией ошибочных действий персонала. Поскольку радиоэкологические и социально-экономические последствия таких аварий могут быть весьма значительными, федеральными нормами и правилами регламентируется необходимость их анализа при проектировании и разработке мероприятий по управлению с целью:

- предотвращения развития аварии и ослабления ее последствий;
- защиты контайнмента от разрушения и поддержания его работоспособности;
- возвращения АЭС в контролируемое состояние, при котором прекращается цепная реакция деления, обеспечивается постоянное охлаждение топлива и удержание радиоактивных веществ в установленных границах.

К настоящему времени разработан ряд расчетных кодов, которые моделируют процессы с участием расплава активной зоны (кориума) – смеси расплава оксидного топлива с конструкционными материалами активной зоны на внутрикорпусной фазе аварии или еще более сложных систем, образующихся после взаимодействия кориума со сталью и бетоном за пределами корпуса реактора. Моделирование развития тяжелой аварии может быть сформулировано как задача нестационарного тепло-массообмена с химическими реакциями в неравновесной системе с тремя агрегатными состояниями вещества и изменяющейся топологией.

При разработке мероприятий по локализации кориума разработчики и пользователи тяжелоаварийных кодов, а также проектировщики АЭС, сталкиваются со следующими проблемами:

- понимание и описание высокотемпературных теплофизических и физико-химических процессов в широком диапазоне изменения параметров;

- выявление ключевых эффектов для адекватного прогноза развития аварии;
- получение данных по физико-химическим свойствам смесей тугоплавких окислов в широком диапазоне температуры;
- оценка неопределенностей расчетных моделей;
- валидация и верификация расчетных программ.

Прогресс в решении указанных проблем может быть достигнут только на основе систематических экспериментальных исследований.

Очевидно, что проведение экспериментов в натуральных условиях невозможно. Даже результаты детальных исследований послеаварийного состояния реакторов АЭС ТМІ-2 и ЧАЭС-4 имеют ограниченное применение вследствие особенностей развития этих аварий и конструкций реакторов. Поэтому большинство экспериментов выполняют во вне реакторных условиях в уменьшенном масштабе. При этом для получения и применения результатов требуется, во-первых, проектирование экспериментальной установки, адекватно моделирующей исследуемый процесс, во-вторых, тщательный анализ и "экстраполяция" данных на реальную реакторную ситуацию, что зачастую является нетривиальной задачей. При невозможности применения в полном объеме теории подобия вследствие комплексности и многообразия процессов при тяжелой аварии возрастает роль сравнительного анализа и приближенных оценок.

Основными техническими и технологическими проблемами при выполнении экспериментальных исследований являются:

- подготовка и локализация высокотемпературного радиоактивного химически агрессивного расплава кориума, состав и свойства которого изменяются в широком диапазоне;
- физическое моделирование остаточного тепловыделения в расплаве от продуктов деления;
- технологические сложности, связанные с требованием к вариации состава атмосферы над расплавом (нейтральная, воздушная, паровая);
- необходимость манипулирования с расплавом (слив расплава в экспериментальную секцию, отбор проб кориума, перемещение расплава);
- методические, инструментальные и материаловедческие проблемы обеспечения высокотемпературных измерений;
- разработка, обоснование и реализация технических и организационных мер, обеспечивающих ограничение воздействия на окружающую среду исследуемых материалов.

Вышеуказанное, с одной стороны, объясняет уникальность выполненных в этой области экспериментальных исследований, а с другой стороны, обуславливает высокую актуальность работ в этом направлении. Несмотря на то, что экс-

периментальными исследованиями по тяжелым авариям в мире занимаются уже более 20 лет, имеется весьма ограниченное число экспериментальных данных по кориуму и процессам его взаимодействия с различными материалами, которые необходимы для разработки замыкающих зависимостей в математических моделях, а также для валидации и верификации расчетных кодов. Кроме того, большинство опытов выполнено на имитаторах кориума (расплавах металлов, солей и термитных смесей), значительно отличающихся от прототипного кориума по теплофизическим и физико-химическим свойствам.

**Целью работы** является разработка методов и средств в обеспечение экспериментального исследования процессов тяжелой аварии АЭС с ВВЭР и определение базовых качественных характеристик взаимодействия расплава кориума с материалами АЭС и водяным теплоносителем. В процессе реализации данной цели были сформулированы и решались следующие основные задачи:

- Разработка экспериментальных установок и обеспечение работоспособности ее отдельных узлов.
- Разработка методов ограничения взаимодействия компонентов кориума с углеродом при получении расплава кориума в графитовом тигле при использовании индукционной плавки в "горячем тигле".
- Получение экспериментальных данных по взаимодействию отдельных компонентов кориума между собой в маломасштабных экспериментах.
- Определение характеристик образующихся внутри и за пределами корпуса реактора продуктов взаимодействия прототипного кориума с водой (FCI).
- Определение характеристик продуктов взаимодействия кориума с бетоном (MCCI) при наличии и отсутствии остаточного тепловыделения в кориуме.

**Защищаемые положения.** На защиту выносятся:

1) Метод подавления активности углерода для повышения чистоты плавки в графитовом тигле и его реализация для получения большой массы высокотемпературного расплава кориума.

2) Результаты экспериментального тестирования материалов электроплавильного узла, используемого для подготовки расплава прототипного кориума.

3) Результаты исследования продуктов взаимодействия прототипного кориума с материалами АЭС, полученных в крупномасштабных экспериментах на установке с индукционным нагревом.

4) Разработанные на основе анализа натуральных испытаний феноменологические модели взаимодействия кориума с теплоносителем, материалом корпуса и бетоном.

**Научная новизна.** Для подавления активного химического взаимодействия при высокой температуре между компонентами кориума и материалом плавиль-

ного тигля, в качестве которого в экспериментальных установках ИАЭ НЯЦ РК применяется графит, автором впервые предложен и реализован метод подавления активности углерода при высокой температуре за счет нанесения расплавленного циркония на внутреннюю поверхность тигля. Метод прошел успешную апробацию в маломасштабных экспериментах и в настоящее время реализован в крупномасштабной установке.

Предложены и экспериментально исследованы новые методы и средства определения теплофизических свойств материалов электроплавильных узлов, примененных в установке для получения высокотемпературного расплава прототипного кориума. Новизна методов и устройств для определения теплофизических свойств материалов в широком диапазоне температур подтверждена несколькими авторскими свидетельствами.

Представлены новые результаты исследований продуктов внутри- и внекорпусного взаимодействия расплава прототипного кориума с водой, материалом корпуса и бетоном, выполненных в крупномасштабных экспериментах при сливе расплава в экспериментальную секцию и при моделировании остаточного тепловыделения в кориуме (для экспериментов МССИ), которые позволяют уточнить модели взаимодействия.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений.** Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается обширными экспериментальными данными, полученными в маломасштабных и крупномасштабных экспериментах с расплавом прототипного кориума. Достоверность полученных экспериментальных результатов обуславливается применением оригинальных метрологически аттестованных методик, автоматизированных приборных и измерительных комплексов, анализом погрешностей измерений и подтверждается сравнением с результатами других исследователей.

**Фактическая основа работы и методы исследования.** Фактическую основу работы составили методики исследований и результаты экспериментов, выполненных автором в 1978–2003 годах в Объединенной экспедиции ПНИТИ (с 1993 г. – в Институте атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан) согласно ежегодным отраслевым планам НИР и ОКР головной организации (а с 1993 года – по бюджетным научно-техническим программам министерства энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан), а также по международным программам.

Для определения теплофизических характеристик материалов электроплавильного узла для получения расплава прототипного кориума применен модернизированный автором импульсный метод определения температуропроводно-

сти и теплопроводности твердых материалов. Повышение чистоты получения расплава кориума в графитовом тигле достигнуто применением защитного покрытия на внутренней поверхности тигля, эффективность и границы применения которого испытаны в многочисленных маломасштабных экспериментах.

В качестве методов пост тест исследования использованы: рентгенофлуоресцентный анализ, оптическую микроскопию, рентгеновский фазовый анализ. Для определения физических свойств материалов – продуктов взаимодействия кориума с водой и бетоном применены оригинальные устройства, разработанные и изготовленные с участием автора.

Для анализа результатов экспериментов применены типовые подходы, позволяющие сравнивать полученные результаты с известными данными.

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие на всех этапах работы, изложенной в диссертации:

- разработал и применил метод ограничения взаимодействия компонентов кориума с графитом тигля при получении расплава;
- модернизировал и внедрил импульсный метод для изучения температурной зависимости теплофизических характеристик материалов электроплавильного узла экспериментальной установки;
- принимал участие в проектировании экспериментальных установок и в разработке программ исследования;
- руководил выполнением пост тест исследований экспериментов по моделированию различных сценариев тяжелой аварии на АЭС и принимал участие в анализе результатов;
- разработал феноменологические модели взаимодействия расплава кориума с теплоносителем и бетоном.

**Практическая значимость и реализация результатов.** Результаты, полученные автором, использованы для решения важных прикладных задач, в том числе:

- методы, разработанные автором, применены в крупномасштабных установках для экспериментального моделирования различных сценариев тяжелой аварии с плавлением активной зоны ВВЭР с применением прототипного кориума;
- результаты экспериментального тестирования материалов электроплавильного узла позволили промоделировать и усовершенствовать технику экспериментов;
- базы данных по характеру и степени взаимодействия расплава прототипного кориума с водяным теплоносителем, материалом корпуса и бетоном дополнены полученными автором результатами.

**Апробация работы.** Результаты работы были доложены и обсуждены на

национальных и международных конференциях, семинарах и совещаниях, в том числе: на международной конференции ОЭСР по внекорпусному захлаживанию кориума (Карлсруэ, Германия, 15–18 ноября, 1999); на 3-м международном совещании по теплогидравлике и безопасности ядерных реакторов (Сеул, 13–16 октября, 2002); на международном конгрессе по совершенствованию атомных станций (Сеул, 15–19 мая, 2005); на регулярных совещаниях контактной экспертной группы Еврокомиссии по проектам МНТЦ по управлению тяжелыми авариями.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, имеет общий объем 158 страницы, содержит 17 таблиц, 94 рисунков. Список использованных источников содержит 122 наименования.

**Публикации.** По теме диссертации автором опубликовано 14 работ, перечень которых приведен в конце реферата.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В первой главе** диссертации приведены феноменологическое описание сценариев тяжелой аварии и краткий обзор состояния исследования процессов по различным национальным и международным программам, позволивший акцентировать наиболее важные направления исследований. Выделена последовательность физико-химических взаимодействий между компонентами активной зоны, имеющая место при аварийном разогреве топливных сборок.

Выполнен обзор зарубежных экспериментальных исследований и сформулированы этапы развития тяжелых аварий, на которых сосредоточено внимание специалистов, связанных с проектированием и эксплуатацией АЭС.

**Сценарий выхода кориума из корпуса.** Необходимо определение наиболее вероятных сценариев выхода кориума и эволюции во времени расхода расплава, его состава и температуры. Распространение и локализация расплава в реакторе и/или контейнменте важны с точки зрения, например, любого последующего противоаварийного мероприятия, и сильно зависят от давления в 1-м контуре и места повреждения корпуса реактора.

**Взаимодействие струи кориума с конструкционными материалами** связано с выходом кориума за пределы корпуса. Необходимо экспериментальное изучение скорости абляции стали и бетона при взаимодействии со струей кориума с целью разработки соответствующей расчетной модели.

**Абляция бетона при МССИ** при различных типах бетонов, которые рассматриваются для использования в качестве строительного или жертвенного материала для бетонной шахты и ловушек расплава активной зоны.

Экспериментальные исследования МССИ с подачей воды на поверхность

кориума активно выполнялось в Сандийских Национальных лабораториях (SNL) и Аргонской Национальной лаборатории (ANL). В экспериментах был использован прототипный кориум, состоящий, главным образом, из диоксида урана ( $UO_2$ ) и диоксида циркония ( $ZrO_2$ ). Эти работы основываются на имеющихся знаниях по феноменологии МССИ и охлаждаемости кориума за пределами силового корпуса. Но большинство экспериментов были выполнены для одномерной (1-D) геометрии, в которой термически эродировало только бетонное основание. Кроме того, не была выполнена количественная оценка механизма охлаждения кориума, наблюдаемого в экспериментах, из-за недостатка информации и сложности явления. Таким образом, МССИ и охлаждение кориума за пределами корпуса до сих пор остаются нерешенной проблемой безопасности ЛВР.

Теплопередача от расплава с внутренним энерговыделением к ограничивающим бассейнам поверхностям, в том числе при наличии газов в расплаве.

Совместные тепло-гидравлические и физико-химические эффекты в процессе кристаллизации многокомпонентных расплавов кориума при МССИ. При низкой скорости затвердевания на холодной поверхности раздела может формироваться твердый слой тугоплавких компонентов расплава.

Когда горячий расплав кориума поступает в водный бассейн, может образоваться слой фрагментов, характеризующийся определенной открытой пористостью. Охлаждаемость такого слоя может быть достигнута за счет отвода тепла при естественной циркуляции воды.

Растекание кориума для создания тонкого слоя расплава перспективно для создания хороших условий охлаждения расплава. Из экспериментов, выполненных в рамках 4-ой Программы Еврокомиссии, как для расплавов имитаторов (CORINE, KATS, RIT), так и для расплавов прототипного кориума (VULCANO, FARO, COMAS) получены результаты, необходимые для понимания процессов растекания и сопутствующих эффектов. Важный результат состоит в том, что многокомпонентные расплавы кориума способны растекаться, даже если их температура ниже температуры ликвидуса. Фиксация расплава происходила, когда в процессе охлаждения в нем образовывалась значительная доля твердой фазы, что увеличивало вязкость расплава. Присутствие мелкого слоя воды не оказывало значительного влияния на растекание, при этом не наблюдались энергетически эффективные взаимодействия расплава с водой.

Для наилучшей характеристики процессов растекания в устройствах локализации расплава (УЛР) с большими поверхностями (типа УЛР для EPR) имеющаяся экспериментальная информация должна быть оценена и систематизирована относительно ожидаемых условий аварии. Коды для расчета растекания получили широкое развитие и должны быть верифицированы по результатам соответствующих экспериментов.

При падении струи кориума в воду во внутрикорпусных условиях форми-

руется слой фрагментов (не менее 50 % от массы расплава) на слитке нефрагментированного кориума. Паровые взрывы малой интенсивности наблюдались только тогда, когда они были специально инициированы. Эти результаты, тем не менее, не могут быть однозначно экстраполированы на сценарий аварии за пределами корпуса, например, из-за различий в конечном составе расплава и большего недогрева воды.

Во внекорпусных условиях возможна почти полная фрагментация струи падающего расплава, что создает хорошие условия для охлаждения. В то же время отмечен, существенный для процессов в контайнменте, значительный выход пара и водорода после резкого охлаждения расплава. Механизмы генерации водорода в процессе фрагментации, как наблюдалось в экспериментах FARO, заслуживают дальнейшего рассмотрения, чтобы прояснить особенности взаимодействия кориума и воды.

В экспериментах TROI (KAERI) зарегистрированы спонтанные паровые взрывы при взаимодействии расплава кориума с недогретым теплоносителем и, в отличие от экспериментов FARO и KROTOS, частота возникновения спонтанных паровых взрывов была значительно выше, чем в ранее выполненных экспериментах в исследовательском центре ISPRA, даже при отсутствии внешнего триггера. Исследователи предположили наличие ряда условий, способствующих возникновению парового взрыва. К таким условиям были отнесены: количество генерируемого водорода в процессе FCI, геометрия испытательной секции (соотношение поперечных размеров "вода/расплав"), форма струи расплава (компактная или фрагментированная), химический состав кориума и его перегрев над температурой ликвидус.

Помимо падения струи кориума в воду эксперименты COTELS охватывают также моделирование залива расплавов сверху для внекорпусных условий. Факторы, которые влияют на процесс охлаждения: образование фрагментированного слоя, взлом корки и выброс расплава за счет газов от разложения бетона должны быть исследованы в дальнейшем более подробно. Хотя прекращение абляции бетона не гарантируется, верхний залив расплава кориума в процессе взаимодействия расплава с бетоном может быть полезен в процессе поздней фазы аварии и для снижения выброса радиоактивных аэрозолей в контайнмент. Следует отметить, что паровые взрывы не наблюдались при подаче воды на поверхность расплава в экспериментах MACE, COTELS и KATS.

В концепции донного залива (эксперименты COMET) вода подавалась в донный слой расплава или через инжекционные насадки, или через слой пористого бетона. Эксперименты показали быстрое и полное отверждение главным образом за счет создания пористой структуры твердеющего расплава. Концепция донного охлаждения применима к перспективным и к некоторым существующим АЭС. Однако следует учитывать пиковое повышение давления в кон-

тайнменте за счет залпового образования пара и резкий выброс водорода.

Крайне важно знать физико-химические свойства расплава кориума для понимания и моделирования поведения расплава. Были измерены температуры плавления – затвердевания для расплавов U-Zr-O с композициями, типичными для BWR и PWR. Исследования продолжаются в рамках международного проекта OECD MASCA.

Еще одна важная проблема – механическая прочность корки кориума при термомеханической нагрузке. Это особенно важно для остановки растекания расплава в концепции EPR, а также для исследования охлаждаемости при условии верхнего залива, когда охлаждение будет успешным лишь в случае растрескивания корки, что способствует захолаживанию расплава.

**Во второй главе** приведено краткое описание созданных экспериментальных установок, описан метод получения расплава кориума в электроплавильной печи, способ перемещения расплава в экспериментальную секцию, методы моделирования поведения расплава при взаимодействии с элементами конструкции реактора. Представлено описание методов и результатов выбора материального состава электроплавильной печи (ЭПП). Приведено описание системы сбора и регистрации параметров экспериментов, перечень методов и средств исследований продуктов взаимодействия прототипного кориума с конструкционными материалами ЛВР и теплоносителем.

В Институте атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан создан экспериментальный стенд для проведения внереакторных исследований в области безопасности атомной энергетики. Стенд позволяет получать до 60 кг расплава прототипного кориума ЛВР методом индукционной плавки в "горячем тигле" с последующим сливом расплава в экспериментальную секцию. В экспериментальной секции выполнялись исследования взаимодействия кориума с теплоносителем, материалом силового корпуса реактора или бетоном, в зависимости от целей эксперимента. При этом моделировались остаточное тепловыделение в расплаве при исследовании взаимодействия кориума с бетоном и работа систем безопасности с помощью имитаторов штатных систем.

Экспериментальная установка "ЛАВА" включала в себя два основных функциональных блока: электроплавильную печь (ЭПП) для подготовки расплава прототипного кориума с заданной температурой (см. рис. 1) и устройство приема расплава (УПР), в котором размещалась экспериментальная секция для моделирования исследуемых процессов.

Недостаток метода "горячего тигля", в отличие от метода плавки в "холодном тигле" (или в "гарнисаже"), состоит в неизбежном взаимодействии компонентов кориума с материалом тигля при высокой температуре.

Наиболее оптимальным материалом плавильного тигля является графит, благодаря его высокой термостойкости, а также соответствию удельного элек-

тросопротивления частоте имеющегося генератора. Но при разогреве до температуры выше 1500 °С молекулы углерода, "испаряющиеся" с внутренней поверхности тигля, создают восстановительную среду в полости тигля, что приводит, в конечном итоге, к высокому содержанию карбидов и оксикарбидов в результирующем расплаве. Это, в свою очередь, существенно искажает характеристики бассейна расплава и последующих тепловых и физико-химических процессов при дальнейшем взаимодействии расплава с теплоносителем и конструкционными материалами.

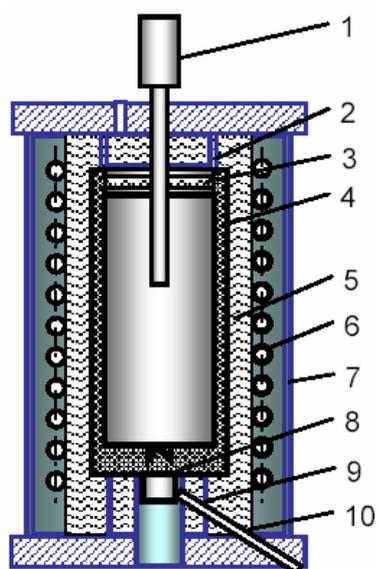
Для изучения эффективности различных способов ограничения взаимодействия между углеродом и компонентами кориума выполнена серия маломасштабных экспериментов на установке индукционного нагрева с генератором ВЧГ-135. Изучены следующие варианты защиты:

- вставки из металлического тантала внутри графитового тигля;
- покрытия из тугоплавких карбидов на внутренней поверхности тигля;
- наплавка из металлического циркония;
- вольфрамовые вставки внутри графитового тигля.

В результате выполненных экспериментов выявлено, что наиболее оптимальным способом защиты поверхности графитового тигля от взаимодействия с компонентами активной зоны является покрытие внутренней поверхности тигля расплавом циркония с последующей самопроизвольной карбидизацией нанесенного металлического циркония за счет диффузии углерода от стенки тигля.

Для обеспечения равномерного покрытия стенок было реализовано и исследовано несколько способов начального расположения циркония в тигле, а также выбран оптимальный режим разогрева, позволяющий избежать карбидизации циркония до начала его плавления. Масса загружаемого циркония подбиралась опытным путем и зависела, в общем случае, от пористости графита (марки графита) и, в меньшей степени, от темпа разогрева.

Покрытие испытано при плавлении прототипного кориума с различной степенью окисленности. Выдержка кориума в тигле с покрытием из карбида циркония в течение 2-х часов показала удовлетворительную надежность найденного способа предотвращения взаимодействия компонентов кориума с углеродом.



↓ В экспериментальную секцию

- 1 – пирометр; 2, 9 – опорные втулки;  
3 – крышка тигля; 4 – графитовый тигель;  
5 – теплоизоляция; 6 – индуктор; 7 – корпус; 8 – пробка тигля; 10 – механизм скола пробки.

Рис. 1.: Электроплавильная печь индукционного типа

Для обеспечения требуемых режимов разогрева смеси материалов активной зоны исследованы теплофизические свойства графита, применяемого для изготовления тиглей, и графитового войлока (теплоизоляции тигля) в широком диапазоне температуры. Для этой цели использован метод "вспышки", усовершенствованный автором в более ранних работах.

Для определения теплофизических характеристик образцов графита, применяемого для изготовления плавильного тигля, в широком диапазоне температуры был предложен метод, позволяющий выполнить измерение необходимых параметров в диапазоне времени, когда влияние теплообмена еще не искажает формы температурного отклика. Метод основывался на измерении наперед заданного отношения температур на фронтальной и тыльной поверхностях образца.

Получено расчетное соотношение для температуропроводности:

$$a = \frac{\xi_0 L^2}{\pi^2 \tau_{2,97}}, \quad (1)$$

где  $\tau_{2,97}$  – момент времени, когда отношение температур на противоположных поверхностях образца в результате теплового импульса равно:

$$\frac{T(0, \tau_{2,97})}{T(L, \tau_{2,97})} = \frac{Q_0(\xi_0)}{Q(\xi_0)} = 2,97$$

Удельная теплоемкость материала может быть определена как:

$$C_p = \frac{q}{\rho L T_M}, \quad T_M = T(0, \tau_{2,97}) - T(L, \tau_{2,97}) = \Delta T, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>,

$C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

$q$  – удельная энергия теплового импульса, Дж/м<sup>2</sup>.

Расчетное соотношение для теплопроводности ( $\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho$ ) имеет вид:

$$\lambda = \frac{\xi_0 q}{\pi^2 L T_M \tau_{2,97}} = \frac{1,386 q}{\pi^2 L \Delta T \tau_{2,97}}. \quad (3)$$

Экспериментальные исследования теплопроводности на образцах в виде дисков выполнялись с применением плоского нагревателя, помещенного между двумя одинаковыми образцами, а искомые параметры рассчитывались по формуле (3).

Теплофизические характеристики опорных цилиндрических втулок в методе "вспышки" определялись по времени  $\tau_{1/2}$  достижения половины максимального прироста температуры на внешней поверхности образца, вызванного тепловым им-

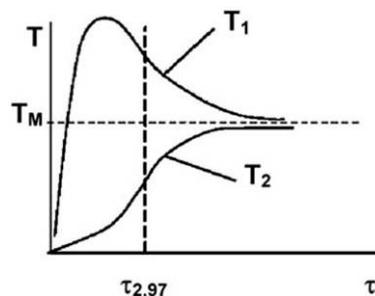


Рис. 2.: Типовые температурные отклики на поверхностях образца

пульсом, и значению максимального подъема температуры:

$$a = \frac{\beta(k)(R_2 - R_1)^2}{\pi^2 \tau_{1/2}}, \quad \lambda = \frac{\beta(k)Q_L(R_2 - R_1)}{\pi^2(R_2 + R_1)T_M \tau_{1/2}}, \quad C_p = \frac{Q_L}{\pi(R_2^2 - R_1^2)T_M \rho}, \quad (4)$$

где  $R_1, R_2$  – внутренний и наружный радиусы цилиндра, м;

$\beta(k)$  – расчетный коэффициент, зависящий от отношения радиусов цилиндра;

$Q_L$  – удельная мощность теплового импульса, Дж/м;

$T_M$  – максимальный подъем температурного отклика на внешней поверхности цилиндра.

Тепловой импульс воздействовал на внутреннюю поверхность цилиндрического образца, а на его внешней поверхности регистрировался температурный отклик, характерный вид которого аналогичен нижней кривой на рисунке 2.

В данной главе рассмотрены также методические аспекты применения пирометра спектрального отношения для измерения температуры кориума в процессе разогрева и плавления исходных компонентов. Приведены результаты анализа погрешностей измерений при использовании различных типов моделей абсолютно черного тела.

В пятом разделе главы описана процедура крупномасштабных экспериментов с применением 60 кг расплава прототипного кориума. Дано краткое описание экспериментальных секций для моделирования взаимодействия кориума с водяным теплоносителем для внутрикорпусных и внекорпусных условий, материалом корпуса реактора и бетоном контайнмента. Описана маломасштабная установка, применявшаяся для отработки технологии нанесения защитных покрытий на графитовые тигли, а также для экспериментальной проверки эффективности различных методов предотвращения взаимодействия между компонентами кориума и углеродом.

В заключительном разделе главы приведено описание методов и аппаратуры для исследования продуктов взаимодействия расплава прототипного кориума с водой и бетоном после крупномасштабных экспериментов.

В первом разделе **третьей главы** описаны результаты экспериментов со сливом кориума в водный бассейн, находящийся в модели корпуса ВВЭР.

В экспериментах в качестве УПР были использованы модели корпуса из нержавеющей стали двух типоразмеров – с внутренним радиусом 0,245 и 0,391 м, толщина стенки модели 25 мм. Конструкция и основные размеры моделей показаны на рисунке 3.

Масса слитого кориума определялась после каждого эксперимента индивидуально и составила от 30 до 50 кг в разных испытаниях. Начальная температура кориума измерялась в ЭПП пирометром и составила 2600...2800 °С. Состав кориума моделировал условия тяжелой аварии в реакторе с кипящей водой (BWR). В модель днища перед сливом расплава наливалась вода при температуре ~330 К

глубиной около 160 см (24,5 л). Через ~25 секунд после слива расплава в модель корпуса подавалась вода из специальных форсунок с расходом 70 г/с.

В результате экспериментов было установлено, что почти половина сливаемого кориума раздробилась на частицы, и слой частиц располагался поверх их агломератов и сплошного слитка. Высокая доля фрагментированного кориума могла быть вызвана большой высотой слива струи, приводящей к увеличению скорости входа кориума в воду. Как показали результаты предварительных экспериментов на установке "СЛАВА" по изучению параметров струи кориума, сливаемого в экспериментальную секцию, приблизительно 30 процентов сливаемого кориума фрагментируется в процессе падения расплава.

Типичная схема расположения кориума в модели корпуса после взаимодействия с водой в эксперименте ЛН-6 показана на рисунке 4. Подобная схема была характерна для большинства выполненных экспериментов, различие состояло только в соотношении масс "фрагменты/слиток".

Исследование степени фрагментации кориума методом Розина – Раммлера позволило предположить отсутствие парового взрыва при первичном взаимодействии "кориум/вода".

Большинство фрагментов имеет весьма развитую поверхность за счет наличия пористости. Многие частицы имеют обширные открытые и закрытые поры. Обнаружено, что большей плотностью обладают, как правило, срединные слои. Вероятно, что в процессе разогрева и плавления исходной шихты имело место частичное восстановление окислов урана и циркония в углеродной среде, а в дальнейшем, в процессе верхнего залива бассейна кориума водой, происходило повторное окисление металлических компонентов.

Эрозия стенки модели корпуса наблюдалась только в одном из экспериментов, в котором имела место наибольшая температура расплава перед его сливом в экспериментальную секцию (около 2950 °С).

На основании результатов измерения температуры в стенке модели и смещения самой стенки, а также баланса воды, полученных в серии экспериментов по взаимодействию расплава кориума с днищем силового корпуса при наличии внешнего охлаждения и внутреннего залива, разработан расчетный код. Основ-



Рис. 3.: Схема и основные размеры модели корпуса

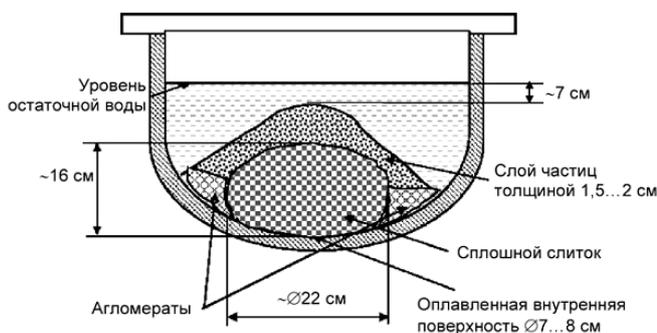


Рис. 4.: Схема расположения кориума в модели корпуса

ные явления, моделируемые кодом LIDEC, показаны на рисунке 5.

Верификация кода LIDEC выполнена по результатам экспериментов LHI и аналогичных экспериментов с окисью алюминия. Подтверждено, что код LIDEC способен воспроизвести термические процессы в стенке корпуса. Но из-за феноменологических неопределенностей код LIDEC систематически завышает тепловую нагрузку на стенку силового корпуса реактора.

Во втором разделе **третьей главы** описаны результаты экспериментов со сливом кориума в водный бассейн, находящийся за пределами корпуса ВВЭР на бетонном основании.

В настоящей работе рассмотрены результаты 8 экспериментов, в которых около 60 кг прототипного кориума сливалось в водный бассейн. Схема эксперимента показана на рисунке 6.

В большинстве экспериментов длительность импульса давления, измеренного в экспериментальной секции, составила 0,5 секунды, что сравнимо с длительностью импульса, наблюдаемого при паровом взрыве, затем давление постепенно приближалось к квазистационарному значению в течение 10 секунд.

Энергетически сильного парового взрыва не наблюдалось ни в одном из экспериментов. Большая часть слитого кориума фрагментировалась, и только незначительная часть расплава была найдена на дне бассейна в виде застывшего слитка. Размер частиц кориума хорошо соотносится с первым импульсом давления – они значительно крупнее, чем обычно при паровом взрыве. Измеренное давление в квазистационарном режиме оказалось меньше расчетного, полученного на основании запасенного в расплаве тепла, вследствие генерации неконденсируемого газа в результате возможного окисления металлических компонентов кориума.

Для экспериментального моделирования взаимодействия кориума с водой и бетоном в мелком водном бассейне на дне устройства приема расплава было установлено бетонное основание. В процессе управления аварией нижняя полость реактора или бетонной шахты может быть заполнена холодной водой. В экспериментах на установке "ЛАВА" имитировались условия поступления расплава в холодную воду. Матрица экспериментов приведена в таблице 1.

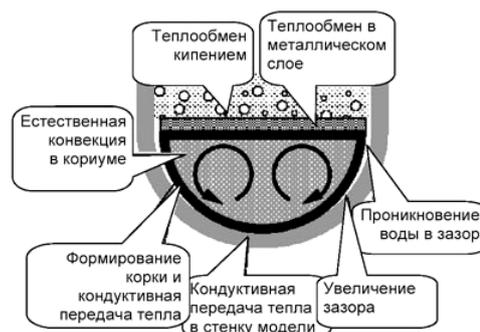


Рис. 5.: Основные явления, моделируемые кодом LIDEC

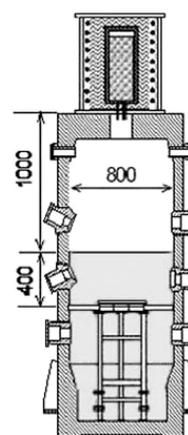


Рис. 6.: Схема экспериментов по изучению FCI

Таблица 1. Матрица опытов

Эксперимент	A1	A4	A5	A6	A8	A9	A10	A11
масса кориума <sup>1)</sup> , кг	56.3	27.0	55.4	53.1	47.7	57.1	55.0	53
глубина бассейна, м	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.4	0.8
температура воды, °С	124	125	115	100	124	125	128	44
начальное давление, МПа	0.20	0.30	0.25	0.21	0.45	0.21	0.32	0.27
газовая среда в УПР	пар	пар	пар <sup>3</sup>	пар	пар	пар	пар	Ar
$\Delta P$ <sup>2)</sup> , МПа	0.03	0.03	0.01	~0	0.07	0.02	0.14	0.13

Примечания. 1) Состав кориума  $UO_2$ : 55 % + Zr: 25 % +  $ZrO_2$ : 5 % + нержавеющая сталь: 15 % (масс.%).

2)  $\Delta P$ : перепад давления между ЭПП и испытательной секцией, обеспечивающий увеличение скорости падения кориума.

3) 80 % пар + 20 % азот.

Во всех экспериментах большая часть кориума фрагментировалась в водяном бассейне. Соотношение "масса фрагментированного кориума/масса слитого кориума" находилось в диапазоне от 0,88 до 1,0. Степень фрагментации не зависела от глубины бассейна и массы кориума в исследуемом диапазоне параметров. В большинстве случаев наблюдалось только несколько килограммов кориума в слитке. Не обнаружено слитков в экспериментах с увеличенной скоростью падения кориума (A8 и A10).

Результаты исследования частиц позволили разработать модель механизма формирования частиц кориума в процессе падения расплава в бассейн, которая объясняет наличие первичной и вторичной фрагментации.

На рисунке 7 представлена группа графиков Розина–Раммлера, которая позволяет сравнивать результаты фрагментации в экспериментах по изучению FCI. В процессе изучения результатов фракционирования замечено, что исключение из анализа самых крупных и самых мелких фракций приводит к лучшему согласованию расчетных и экспериментальных данных. Можно предположить, что наиболее мелкие фракции являются результатом вторичной фрагментации, либо это фрагменты более крупных частиц, разрушенных в результате просеивания.

На рисунке 8 показано выявленное соотношение между первым пиком давления в УПР и среднеобъемным диаметром частиц. Все данные хорошо согласуются, за исключением опыта A11. Можно предположить, что первый пик давления в A11 был подавлен вследствие сильного недогрева воды или более низкой температуры расплава перед его сливом в бассейн.

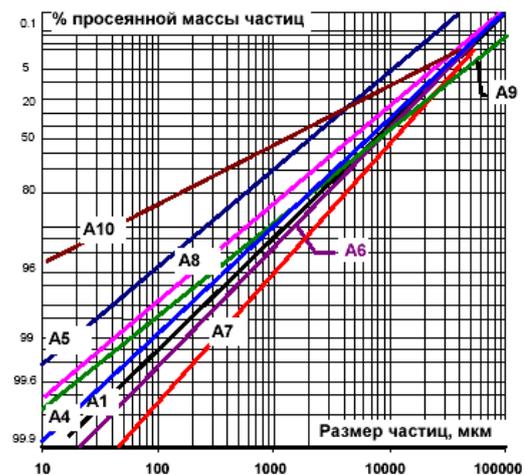


Рис. 7.: Графики Розина-Раммлера для частиц в экспериментах FCI

В целом, результаты взаимодействия кориума с водой внутри силового корпуса и за его пределами имеют много общего. Основное отличие состоит в различном соотношении масс "фрагменты/слиток", что может быть объяснено особенностями теплообмена на нижней границе между упавшим кориумом и подложкой.

**В четвертой главе** приведено описание экспериментов МССИ, результаты исследования продуктов взаимодействия и бетона, результаты поддерживающих экспериментов, выполненных для лучшего понимания происходящих процессов. Приведен анализ результатов и возможные рекомендации к работе систем локализации аварии за пределами силового корпуса. Описана вероятная последовательность взаимодействия кориума с бетоном, исходя из свойств компонентов бетона, применяемого для изготовления экспериментальных секций.

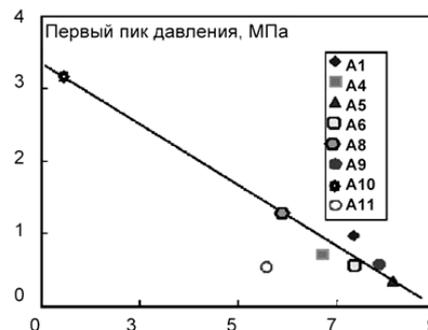
Выполнено 25 экспериментов по исследованию взаимодействия прототипного кориума с бетоном, в которых варьировались следующие параметры:

- отношение кориума толщины слоя к диаметру бетонной ловушки;
- расход воды на поверхность кориума и время задержки начала орошения после падения расплава в ловушку;
- мощность имитатора остаточного тепловыделения в топливе;
- состав прототипного кориума;
- тип бетона.

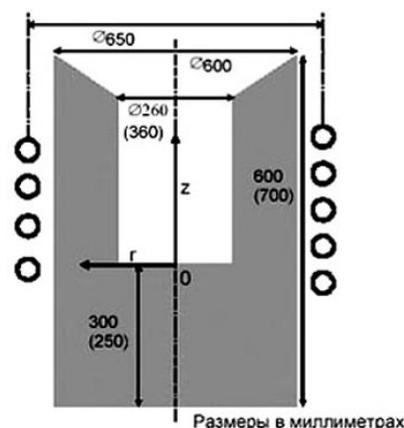
Основной тип бетонной ловушки для исследования МССИ приведен на рисунке 9.

В целом можно выделить две большие группы по конечному результату взаимодействия кориума с бетоном. В первой группе в результате взаимодействия обнаружен слиток кориума, на поверхности которого сформировалась засыпка из мелких частиц продуктов взаимодействия. Во второй группе экспериментов имел место только сплошной слиток кориума на поверхности слабо деградированного бетона.

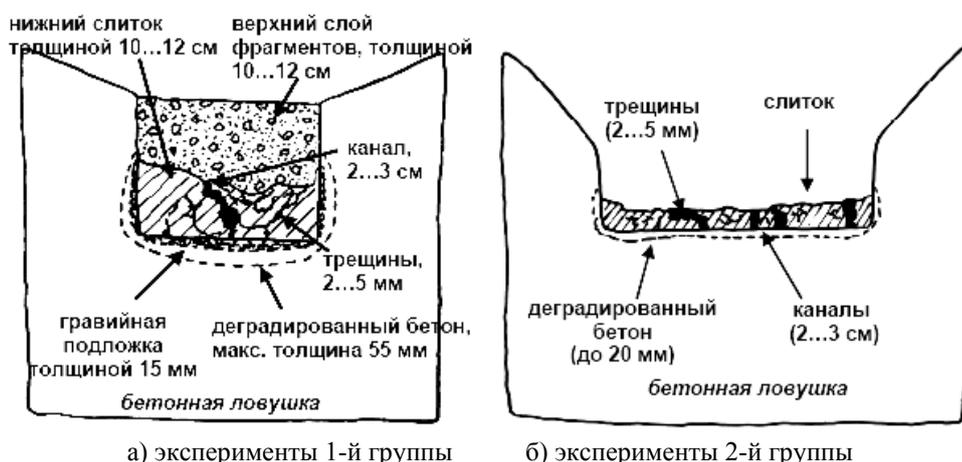
На рисунке 10 показаны типичные схемы расположения кориума в бетонной ловушке после экспериментов первой и второй групп.



Средний объемно-поверхностный диаметр частиц, мм  
Рис. 8.: Соотношение между средним размером частиц и первым пиком давления



Размеры в миллиметрах  
Рис. 9.: Схема бетонной ловушки для исследования МССИ



а) эксперименты 1-й группы      б) эксперименты 2-й группы  
 Рис. 10.: Схемы расположения продуктов МССИ в бетонных ловушках

Для объяснения причин возникновения гравийной подложки в зоне взаимодействия "кориум/бетон" было выполнено более детальное исследование образцов казахстанского гравия. В частности было обнаружено, что казахстанский гравий представлен несколькими видами минералов, отличающимися как по внешнему виду, так и по свойствам.

Экспериментальные исследования термостойкости различных сортов гравия показали, что гравий белого и черного цвета, составляющий более 35 % общей массы выборки, плавится при температуре выше 1700 °С, что соответствует литературным данным для природных кварцитов.

Исследование частиц в экспериментах 1-й группы доказывает, что МССИ продолжается даже при орошении расплава водой, а частицы кориума формируются, преимущественно, в результате взаимодействия "кориум/бетон". Наличие или отсутствие воды в данном случае может влиять на интенсивность образования частиц за счет изменения температуры расплава. Количество образовавшихся фрагментов в большой степени зависит от запасенного в расплаве тепла до начала орошения его водой.

В дополнительной серии из 3-х экспериментов были существенно изменены условия их проведения. Во-первых, из начальной загрузки была исключена нержавеющая сталь. Во-вторых, были изменены размеры бетонной ловушки и индуктора, моделирующего остаточное тепловыделение в топливе, что позволило увеличить удельное энерговыделение в кориуме. В-третьих, дно ловушки было покрыто слоем цементного раствора (без гравия), толщиной примерно 2 см, что привело к интенсивному взаимодействию "кориум/бетон" на начальной стадии эксперимента сразу после слива расплава в ловушку.

Скорость абляции бетона на ранних стадиях экспериментов приведена в таблице 2. Скорости абляции были рассчитаны с использованием метода наименьших квадратов для начальных 1500 или 2000 секунд. Причиной выбора такого временного диапазона послужило то, что он представляется характерным

интервалом изменения скорости абляции, особенно в направлении основания. Сравнивая эксперименты Д11 и Д12, в которых удельное тепловыделение на ранней стадии было почти одинаковым, можно сделать вывод, что была достигнута воспроизводимость скорости абляции бетона.

Таблица 2. Скорость абляции на начальной стадии процесса

Эксперимент	Абляция вниз, мм/с	Абляция в боковую стенку, мм/с
Д11	0,023	0,044
Д12	0,024	0,041
Д13	0,017	Не определено

Скорость абляции боковой стенки была почти вдвое больше, чем абляция бетонного основания.

При анализе эксперимента Д13 применялась усовершенствованная версия кода СОСО для описания МССИ. Процессы, моделируемые кодом СОСО, схематично показаны на рисунке 11.

Эксперименты по МССИ с повышенной мощностью показали, что подача воды ослабляет лишь абляцию бетона боковой стенки. Скорость абляции бетонного основания постоянна даже в случае понижения мощности индуктора. Высказана гипотеза о том, что ослабление абляции боковой стенки вызвано проникновением воды в термически поврежденный бетон.

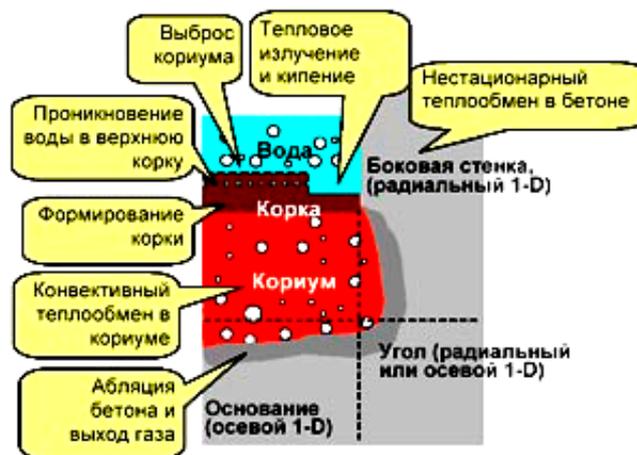


Рис. 11.: Процессы, описываемые кодом СОСО

Обнаружено, что образовалась верхняя корка, скрепленная с боковой стенкой, как это имело место в дополнительных экспериментах с тугоплавкой боковой стенкой (в 1-D конфигурации), что могло привести к снижению отвода тепла в воду.

Выполнена оценка скорости абляции бетона как для бокового, так и для донного направлений после установления квазистационарной абляции. Результат оценки показал, что соотношение скоростей боковой и донной абляции, которое связано с распределением мощности, не зависит от мощности индуктора и практически постоянно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа проведенных исследований и существующих моделей, описывающих различные стадии тяжелой аварии АЭС с ВВЭР, выявлены

процессы тяжелой аварии и проблемы, затрудняющие их экспериментальное исследование. К таким процессам относятся различные типы физико-химического и теплового взаимодействия расплава кориума, сопровождающие его распространение от деградирующей активной зоны до бетонного основания контейнента. Сложность экспериментального исследования обусловлена необходимостью, наряду с изучением локальных эффектов, совместного воспроизведения в экспериментах перемещения расплава, "натурных" свойств кориума, остаточного тепловыделения и достаточного для проявления исследуемых явлений масштаба экспериментальной установки.

2. Для решения задачи комплексного моделирования процессов тяжелой аварии при участии автора создана крупномасштабная установка для экспериментального исследования процессов взаимодействия расплава кориума с водяным теплоносителем, материалом корпуса и бетоном. В установке реализована возможность приготовления до 60 кг расплава прототипного кориума с последующим его сливом в секцию, содержащую водный бассейн, инструментованные модели днища силового корпуса или бетонной шахты, и индукционным нагревом. Для отработки методических вопросов в обеспечение создания крупномасштабной установки и интерпретации результатов выполняемых на ней экспериментов был создан маломасштабный стенд. С его применением были исследованы особенности разогрева и плавления кориума, проверена возможность применения графита в качестве материала горячего тигля, получены образцы кориума и определены его состав и свойства для последующего использования при пост тест анализах крупномасштабных экспериментов.

3. Для обеспечения длительной работоспособности основного, плавильного узла установки разработаны методики определения теплофизических свойств графита и углепластиковых материалов при высоких температурах, а также для формирования защитного циркониевого покрытия графитового тигля.

4. Пост тест исследованиями гранулометрического, фазового и элементного состава фрагментов кориума в опытах по взаимодействию расплава с водой подтверждено отсутствие паровых взрывов во всем диапазоне изменения параметров. Исследованием морфологии и микроструктуры фрагментов объяснено отклонение распределения их размеров от логарифмического закона Розина-Раммлера вторичной фрагментацией при хрупком растрескивании.

5. Пост тест изучение состава и структуры образующихся материалов в экспериментах по взаимодействию расплава с бетоном позволило установить:

- роль гравийного наполнителя в механизме абляции бетона;
- возможность фрагментации поверхностной корки кориума при выходе газообразных продуктов взаимодействия из-за хрупкого разрушения корки;
- влияние степени фрагментации корки на эффективность охлаждения рас-

плава водой;

- отсутствие, в целом, гарантированного предотвращения абляции бетона подачей воды на поверхность кориума.

6. Полученные количественные результаты крупномасштабных экспериментов и материаловедческого исследования продуктов взаимодействия использованы при разработке моделей процессов взаимодействия и верификации соответствующих расчетных кодов.

7. Разработанные методики, экспериментальные установки и полученные результаты являются основой для последующих крупномасштабных экспериментов по длительному удержанию расплава кориума в корпусе реактора с имитацией остаточного тепловыделения от продуктов деления.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

- 1. Жданов В.С., Михеев И.В., Таубин М.Л. Определение теплофизических свойств тонкостенных цилиндров // Теплофизика высоких температур. 1982. Т. XX, № 3. С. 601–603, – 0,5/0,2 п.л. (перечень ВАК).**
- 2. Определение теплопроводности импульсным методом при наличии теплообмена на поверхности образца / В.С. Жданов, М.В. Иванов, И.В. Михеев, М.Л. Таубин // Вопросы атомной науки и техники, Сер. ФРП и РМ. 1983. № 4(27). С. 93–95, – 0,6/0,2 п.л. (перечень ВАК).**
3. Исследования последствий тяжелых аварий водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов по проекту COTELS / А.А. Колодешников, Ю.С. Васильев, В.С. Жданов и др. // Вестник НЯЦ РК. Вып. 1, 2002. С. 5–17, – 1,2/0,4 п.л.
4. Бакланов В.В., Жданов В.С., Малышева Е.В. Экспериментальное изучение способов ограничения взаимодействия компонентов кориума с углеродом // Вестник НЯЦ РК. Вып. 1, 2004. С. 75–85, – 1,2/0,6 п.л.
5. А. с. № 800847 СССР. Способ определения теплофизических характеристик / В.С. Жданов, И.В. Михеев, М.Л. Таубин. Опубл. 30.01.1980. Бюл. № 4, – 0,6/0,2 п.л.
6. А. с. № 873087 СССР. Способ определения теплопроводности материалов / В.С. Жданов, И.В. Михеев, М.Л. Таубин. Опубл. 15.10.1981. Бюл. № 38, – 0,6/0,2 п.л.
7. Zhdanov V., Baklanov V. Facility for LWR Core Materials Studies at High Temperature // Proc. of ICAPP'05 Congress, Seoul, KOREA (May 15–19, 2005). Paper 5242, – 0,8/0,6 п.л.
8. COTELS Project (1): Overview of Project to Study FCI and MCCI during a Severe Accident / H. Nagasaka, Yu. Cherepnin, V. Zhdanov, et al. // OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475, 2000, Karlsruhe, Germany, p. 285–292,

– 0,8/0,2 п.л.

9. COTELS Project (2): Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions / M. Kato, Yu. Vasilyev, V. Zhdanov, et al. // OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475, 2000, Karlsruhe, Germany, p. 293–300, – 0,8/0,2 п.л.
10. COTELS Project (3): Ex-vessel Debris Cooling Tests / H. Nagasaka, I. Sakaki, V. Zhdanov, et al. // OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475, 2000, Karlsruhe, Germany, p. 302–308, – 0,8/0,25 п.л.
11. COTELS Project (4): Structural Investigation of Solidified Debris in MCCI / H. Nagasaka, I. Sakaki, V. Zhdanov, et al. // OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475, 2000, Karlsruhe, Germany, p. 309–316, – 0,8/0,6 п.л.
12. Results of LHI Tests and Associated Analyses on In-vessel Debris Coolability, NTHAS3 / Yu. Maruyama, H. Nagasaka, V. Zhdanov, et al. // 3<sup>rd</sup> Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety Kyeongju, Korea (October 13–16, 2002), – 0,8/0,25 п.л.
13. Recent Results of MCCI Studies in COTELS Project, NTHAS3 / Yu. Maruyama, H. Nagasaka, V. Zhdanov, et al. // Third Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety Kyeongju, Korea (October 13–16, 2002), – 0,8/0,25 п.л.
14. A Study on Concrete Degradation during Molten Core/Concrete Interactions / Yu. Maruyama, Y. Kojima, V. Zhdanov, et al. // Nuclear Engineering and Design 236 (2006). P. 2237–2244, – 0,8/0,25 п.л.