Некоммерческое акционерное общество
«Университет имени Шакарима города Семей»

УДК 621.039

На правах рукописи

БЕКМУЛДИН МАКСАТ КУАТБЕКОВИЧ

Экспериментальное моделирование взаимодействия модельного кориума легководного ядерного реактора с Al_2O_3 - жертвенным материалом с кипящим свинцовым слоем ловушки расплава

8D05302 – «Техническая физика»

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Отечественные научные консультанты:
д.ф.-м.н., профессор Скаков М.К. (РК)
PhD Бакланов В.В. (РК)

Зарубежный научный консультант:
д.т.н., профессор Градобоев А.В. (РФ)

Республика Казахстан
Семей, 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ..... 4
ГЛАВА 1 ЖЕРТВЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЛОВУШКИ РАСПЛАВА ЛЕГКОВОДНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА 9
1.1 Сценарий развития тяжелой аварии на ядерном реакторе..... 9
1.2 Локализация расплава активной зоны при тяжелой аварии с проплавлением корпуса ядерного реактора..... 13
1.3 Жертвенные материалы – основной элемент тигельной ловушки расплава 18
1.4 Выводы к главе 1. Постановка задач..... 24
ГЛАВА 2 ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОРИУМА С ЖЕРТВЕННЫМ МАТЕРИАЛОМ..... 27
2.1 Экспериментальная установка «Лава-Б»..... 27
2.1.1 Электрическая плавильная печь..... 28
2.1.2 Устройство приема расплава 31
2.2 Экспериментальное оборудование для структурно – фазовых исследований..... 32
2.3 Особенности моделирования в ANSYS 34
2.4 Выводы к главе 2 35
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ КОРИУМА ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ НАГРЕВА 37
3.1 Остаточное энерговыделение в кориуме 37
3.2 Моделирование процесса остаточного энерговыделения 39
3.3 Экспериментальное моделирование остаточного энерговыделения кориума индукционным методом на установке «Лава-Б»..... 46
3.4 Формирование бассейна кориума индукционным методом в ловушке расплава установки «Лава-Б»..... 51
3.5 Выводы к главе 3 58
ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОРИУМА С ЖЕРТВЕННЫМ МАТЕРИАЛОМ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И КИПЯЩИМ СВИНЦОВЫМ СЛОЕМ ЛОВУШКИ РАСПЛАВА 59
4.1 Экспериментальное устройство для проведения исследований взаимодействия кориума с жертвенным материалом..... 59
4.2 Результаты экспериментального моделирования процессов взаимодействия кориума с жертвенным материалом 69
4.3 Выводы к главе 4 74
ГЛАВА 5 СТРУКТУРНО – ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ МОДЕЛЬНОГО КОРИУМА ПОСЛЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ЖЕРТВЕННЫМ МАТЕРИАЛОМ..... 75
5.1 Микроструктура модельного кориума в результате взаимодействия с жертвенным материалом 75
5.2 Фазовый и элементный состав модельного кориума после взаимодействия с Al_2O_3 – жертвенным материалом с кипящим свинцовым слоем 84

5.3 Физико-химические преимущества оксида алюминия и свинцового слоя в качестве жертвенного материала ловушки расплава легководного реактора..... 98
5.4 Выводы к главе 5 100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ 102
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 106
ПРИЛОЖЕНИЕ А 116
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 117
ПРИЛОЖЕНИЕ В 118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Как известно, в настоящее время тридцать одна страна мира получает энергию с помощью атомных электростанций. Казахстан также рассматривает возможность строительства реактора «III+». В связи с чем, улучшение безопасности атомных электростанций (АЭС) является одной из актуальных и приоритетных задач. После нескольких крупных аварий все мировое сообщество занято решением данной проблемы. Исходя из опыта эксплуатации атомных электростанций видно, что тяжелая авария может произойти даже при очень низкой вероятности. Существует множество сценариев развития тяжелой аварии, одним из которых является взаимодействие расплава активной зоны реактора с корпусом, с дальнейшим проплавлением его и утечкой в ловушку расплава.

Основным назначением ловушек расплава является локализация процессов остаточного энерговыделения кориума и предотвращение его попадания за пределы ловушки. Ловушка расплава представляет собой стальной корпус с установленными в нем блоками с жертвенным материалам (ЖМ). Сам корпус окружен теплоизоляционными слоями, охлаждаемыми секционированным кольцевым бассейном с кипящей водой. Основное отличие всех ловушек тигельного типа заключается в конструкции и составе жертвенного материала.

Жертвенные материалы как основной элемент тигельной ловушки расплава используются для:

- снижения температуры поступившего в ловушку высокотемпературного расплава кориума;
- уменьшения плотности оксидной части кориума для осуществления гравитационной инверсии с его металлической частью с целью уменьшения выделения взрывоопасного водорода в ходе паро-металлических реакций и обеспечения безопасной подачи воды на поверхность кориума.

Выбор жертвенных материалов для ловушек расплава атомных станций является одной из важнейших задач, определяющих развитие их пассивных систем безопасности. К настоящему времени проведено множество различных испытаний и исследований в этой области, которые позволили сформировать подход и понимание о том, какие материалы предпочтительно использовать в ловушках расплава для эффективной и надежной локализации кориума в случае его выхода за пределы корпуса реактора во время тяжелой аварии с расплавлением активной зоны.

При этом, очевидным становится тот факт, что эффективность теплоотвода, скорость растворения жертвенного материала в кориуме, а также стоимость изготовления является одним из ключевых факторов в обеспечении эффективной локализации. В связи с этим, актуальными становятся способы повышения не только эффективности теплоотвода от кориума, но и увеличения скорости взаимодействия компонентов ловушки расплава с

кориумом наряду с экономичной целесообразностью выбора жертвенного материала.

Целью настоящей диссертационной работы является экспериментальное моделирование взаимодействия кориума с жертвенным материалом из оксида алюминия (Al_2O_3) со свинцовым слоем в условиях моделирования тяжелой аварии с расплавлением активной зоны и изучение структурно – фазового состояния кориума после взаимодействия.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Провести анализ процессов, происходящих при взаимодействии кориума легководного реактора с жертвенными материалами в ловушке расплава и разработать методику экспериментального моделирования их взаимодействия;
2. Выполнить экспериментальное моделирование взаимодействия кориума с жертвенным материалом, в условиях имитации остаточного энерговыделения в кориуме;
3. Провести исследование макро- и микроструктуры, элементного и фазового составов кориума после взаимодействия с жертвенным материалом из оксида алюминия (Al_2O_3) и свинцовым слоем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Компьютерное моделирование взаимодействия кориума с жертвенным материалом из оксида алюминия и свинцового слоя ловушки расплава легководного реактора показало, что использование свинцового слоя обеспечивает теплоотвод 0,45 МВт от кориума за счет тепловой энергии, затрачиваемой на фазовый переход материала кипящего слоя в парообразное состояние;
2. При индукционном нагреве величина удельного энерговыделения в графитовом блоке составляет 2,02 кВт/кг, что соответствует необходимому значению мощности в расплаве кориума (0,41 кВт/кг) для максимального приближения процесса имитации остаточного энерговыделения к реальному;
3. Микроструктура затвердевшего кориума после взаимодействия с жертвенным материалом представлена твердым раствором, состоящим из двух фаз с разным типом кристаллической решетки. На участках «темного» плотного кориума и переходной области взаимодействия кориума с керамическим материалом фаза данного твердого раствора кристаллизовалась в тетрагональной модификации решетки пространственной группы P42/nmc, в то время как на участке «светлого» пористого кориума при том же составе фаза находится в кубической модификации решетки пространственной группы Fm3m.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

- впервые проведено обоснование использования свинцового слоя в качестве составляющей для жертвенного материала ловушки расплава легководного реактора методом компьютерного моделирования;
- разработана и апробирована методика калибровки параметров системы индукционного нагрева для повышения эффективности нагрева при имитации остаточного энерговыделения в кориуме;

- впервые проведены экспериментальные исследования и выявлены особенности взаимодействия кориума ядерного реактора с жертвенным материалом из оксида алюминия (Al_2O_3) со свинцовым слоем в условиях моделирования тяжелой аварии с расплавлением активной зоны.

Объектом исследования является материал, полученный в результате высокотемпературного взаимодействия кориума с жертвенным керамическим материалом из оксида алюминия (Al_2O_3) с кипящим свинцовым слоем.

Предметом исследования являются методические подходы к обеспечению качественного проведения эксперимента и влияние кандидатного жертвенного материала на структурно-фазовое состояние модельного кориума в результате высокотемпературного взаимодействия в условиях моделирования тяжелой аварии.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели и решения задач в настоящей диссертационной работе использовались различные методы исследований, в том числе, как физического и компьютерного моделирования, так и методов исследований структуры и элементного и фазового составов материала.

Использование выбранных методов основано на применении программного обеспечения ANSYS, экспериментального стенда «Лава-Б» и оборудования для проведения материаловедческих исследований.

Компьютерное моделирование представляло собой ряд численных экспериментов по исследованию взаимодействия жертвенного материала с кориумом и выбора способа имитации остаточного энерговыделения в нем, а также разработке теплофизических моделей экспериментальной секции (ловушки расплава).

Экспериментальное моделирование взаимодействия кориума с жертвенным материалом из оксида алюминия (Al_2O_3) со свинцовым слоем в условиях моделирования тяжелой аварии с расплавлением активной зоны проведено на экспериментальном стенде «Лава-Б».

Использование современных материаловедческих методов исследования материалов, полученных в результате экспериментального моделирования взаимодействия жертвенного материала с кориумом, позволило провести комплексный анализ изучаемого взаимодействия.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- разработанные теплофизические модели экспериментальной секции установки «Лава-Б» могут быть использованы для анализа будущих экспериментов по экспериментальному моделированию тяжелой аварии с расплавлением активной зоны;

- разработанная методика калибровки индукционного нагревателя для имитации остаточного энерговыделения в кориуме может быть применена в любых технологических установках, использующих индукционный нагреватель, для повышения эффективности его использования;

- полученные результаты материаловедческих исследований взаимодействия кориума с жертвенным материалом из оксида алюминия (Al_2O_3) со свинцовым слоем в условиях моделирования тяжелой аварии с

расплавлением активной зоны могут быть использованы для усовершенствования ловушек расплава и разработки новых жертвенных материалов с целью повышения надежности пассивных систем безопасности АЭС.

Личный вклад автора является значительным в постановке и формулировке задач диссертационного исследования, проведении аналитического обзора литературных данных, проведении расчетных, экспериментальных, материаловедческих исследований и анализе полученных результатов.

Автор принимал непосредственное участие в формировании методических подходов к обеспечению качественного проведения исследований, проведении эксперимента на установке «Лава-Б» и последующих материаловедческих исследований.

Все работы проводились в тесном сотрудничестве с ведущими учеными и специалистами филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК. Анализ результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, а также формулирование основных выводов, обобщающих результаты исследования и проведенных расчетных, экспериментальных и постэкспериментальных работ, осуществлялись совместно с научными консультантами.

Связь темы с планами научно-исследовательских программ

Результаты, представленные в данной диссертационной работе, получены в рамках выполнения научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» за 2021-2023 гг. (BR09158470) Министерства энергетики Республики Казахстан.

Степень обоснованности и достоверности результатов обеспечивается корректностью и системностью проведенных аналитических и расчетно-экспериментальных исследований. Основные результаты получены с помощью прямых, хорошо апробированных экспериментальных методов исследования.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК для публикации результатов научной деятельности, в рецензируемых зарубежных научных журналах, включенных в базы данных Scopus и Web of Science, а также сборниках трудов международных и отечественных научных конференций.

Апробация результатов диссертационной работы

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах, из них в журналах, индексируемых в базе Scopus и/или Web of Science – 6, в других научных журналах – 1, патент на полезную модель – 1, а также в сборниках трудов международных конференций – 10.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Международных научных конференциях, научных семинарах кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика» НАО «Университет имени Шакарима г. Семей», на заседаниях научно-технического совета филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК, а также на онлайн-семинарах PhD-докторантов региональных ВУЗов.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Диссертация изложена на 118 страницах, содержит 66 рисунков, 12 таблиц и список использованных источников из 125 наименований.

ГЛАВА 1 ЖЕРТВЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЛОВУШКИ РАСПЛАВА ЛЕГКОВОДНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Настоящая глава содержит результаты литературного обзора, посвященного описанию сценариев развития тяжелых аварий на атомных станциях с легководными реакторами, а также внекорпусного удержания расплава активной зоны. Особое внимание было уделено устройству локализации расплава (УЛР) активной зоны вне корпуса реактора и его жертвенным материалам. На основе анализа литературных данных определены современные концепции обоснования использования жертвенных материалов УЛР, их достоинства и недостатки.

1.1 Сценарий развития тяжелой аварии на ядерном реакторе

Как известно, в настоящее время тридцать одна страна мира получает энергию с помощью атомных электростанций (АЭС). Поэтому одним из ключевых аспектов работы такой установки является обеспечение её безопасности. Вопросы безопасности АЭС имеют первостепенное значение. В связи с этим, все возможные сценарии аварийных ситуаций учитываются уже на этапе проектирования АЭС.

Согласно стандартам МАГАТЭ по безопасности [1-5] состояния АЭС делятся на эксплуатационные состояния и аварийные условия. Эксплуатационные состояния подразумевают ожидаемые отклонения от нормального режима работы. Аварийные ситуации охватывают как проектные аварии, так и условия, выходящие за пределы проектных аварий.

Для стабильной и безопасной работы АЭС должны выполняться ряд основных правил, а именно: управление реактивностью, отвод тепла от реактора и защита от излучения и контроль за плановыми радиоактивными выбросами [5].

Согласно [6]: проектная авария - авария, для которой в проекте АЭС определены исходные события и конечные состояния и предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие при независимом от исходного события отказе одного из элементов систем безопасности, учитываемом в проекте АЭС, или при одной, независимой от исходного события, ошибке персонала ограничение ее последствий установленными для таких аварий пределами;

запроектная авария – авария, вызванная не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождающаяся дополнительными по сравнению с проектными авариями отказами элементов систем безопасности сверх единичного отказа, реализацией ошибочных решений персонала.

Также, в литературных источниках в отдельный вид выделяют тяжелую запроектную аварию [7].

Тяжелая запроектная авария (далее тяжелая авария) – это запроектная

авария с повреждением тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) выше максимального проектного предела, при которой может быть достигнут или даже превышен предельно допустимый аварийный выброс радиоактивных веществ в окружающую среду.

Для примера тяжелой аварии остановимся на аварии на АЭС «Fukushima-1». Причиной аварии стало наложение двух катастрофических событий (землетрясения и цунами). Станция, построенная еще в 1970 году, не выдержала воздействия стихий. Проект станции был устаревшим и не предусматривал системы управления авариями, выходящими за рамки проектных. В результате такой неподготовленности произошло наложение двух аварийных ситуаций: потеря внешнего энергоснабжения и отказ дизель-генераторов, что привело к расплавлению активной зоны реактора. При этом образовался радиоактивный пар, который персонал вынужденно сбрасывал в атмосферу. Взрыв водорода, выделившегося при этом, показал отсутствие или недостаточность систем его контроля и подавления на станции [8].

На основании анализа литературной документации [9-15] мы видим, что существует множество сценариев развития тяжелой аварии на АЭС. Сценарий тяжёлой аварии, при которой происходит расплавление активной зоны реактора, возможен в случае невозможности подачи теплоносителя в активную зону для отвода излишек тепла. Основными причинами отказа системы охлаждения активной зоны являются потери внешних источников электроснабжения и отказа резервных дизель-генераторов (авария на АЭС Фукусима-1), либо утечка теплоносителя из контура системы охлаждения (авария на АЭС Три-Майл-Айленд).

Анализ аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» послужил основой для создания сценариев развития аналогичных тяжелых аварий на реакторах типа PWR и его аналогах.

В работах [15, 16] довольно широко расписаны процессы, протекающие в легководном реакторе типа BWR при тяжелой аварии. Диаграмма протекания данных процессов изображена на рисунке 1.

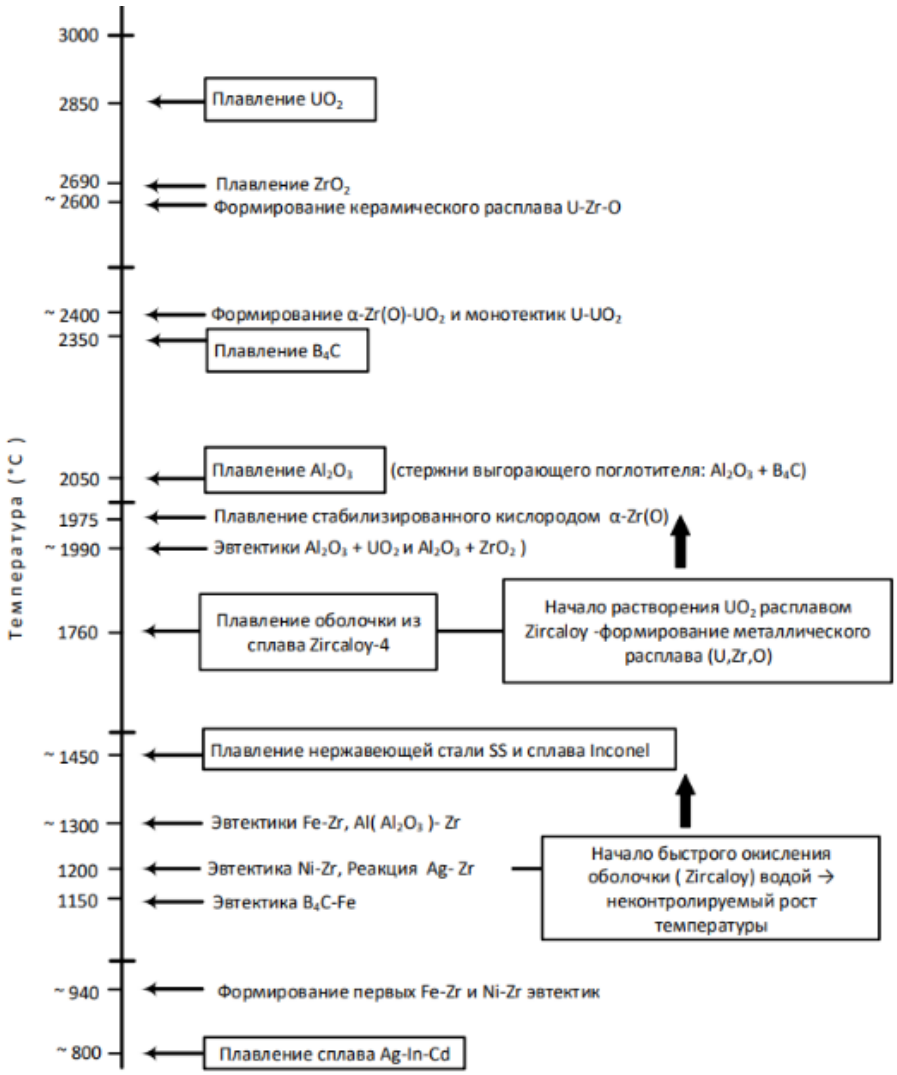


Рисунок 1 – Диаграмма деградации материалов активной зоны реактора во время аварии [16]

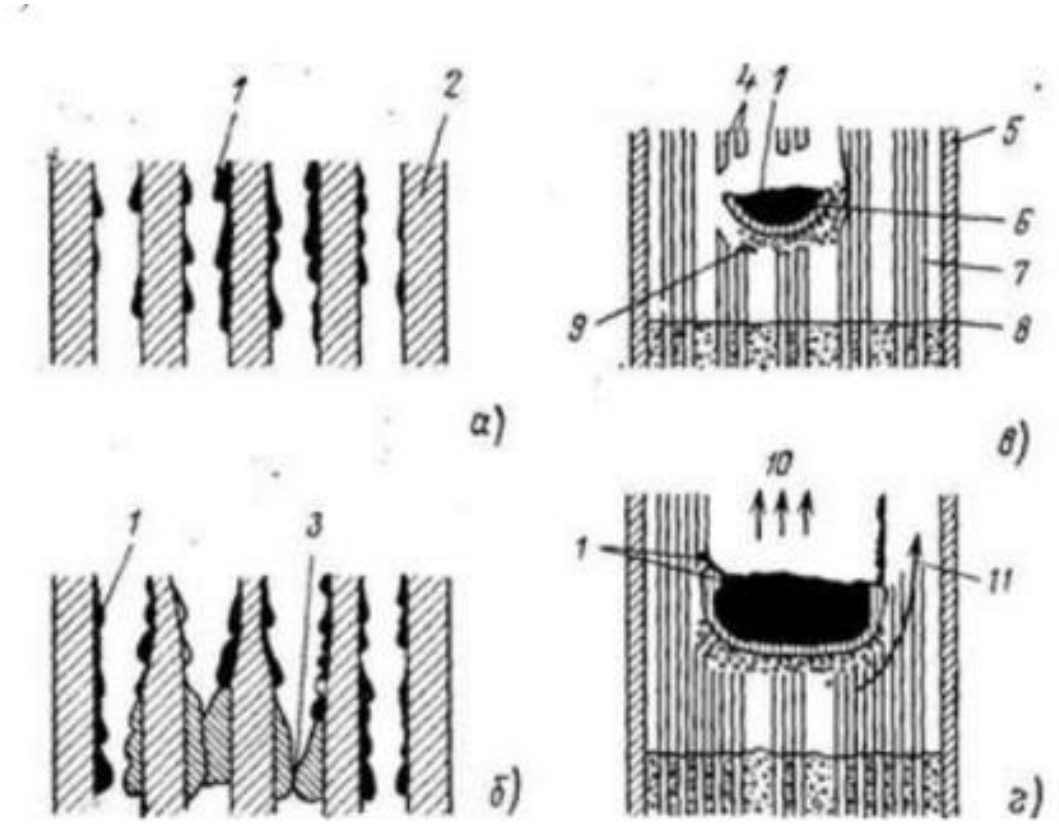
Как видно из рисунка, данная диаграмма довольно точно показывает все протекающие процессы физико-химического взаимодействия материалов активной зоны аварийного реактора, их деградации и последующего разрушения в зависимости от температуры. Это дает нам возможность анализировать все этапы формирования расплава кориума в процессе тяжелой аварии [7]. Теперь более подробно опишем цепь событий, протекающая при тяжелой аварии с проплавлением корпуса реактора:

1. На первом этапы роста температуры активной зоны происходит рост давления газов внутри оболочек твэлов, что вносит значительные помехи движению потока теплоносителя между ними, тем самым затрудняя их охлаждение. При определенных условиях это может привести к разрушению оболочки твэла, и она в конечном итоге разорвется.

2. Дальнейшее увеличение температуры активной зоны приведет к процессу окисления материалов оболочек твэлов. К этому приведет химическая реакция между циркалоем (материал оболочки) и паром. Процесс

окисления материала оболочек будет проходить с дополнительным выделением тепла и переходом циркалоя в оксид циркония.

3. При достижении температуры около 1400 °С начнется плавление материалов активной зоны. Причем, наиболее быстро расплавятся материалы активной зоны в той области, где был наибольший нейтронный поток, т.е. с наибольшей концентрацией продуктов деления, распад которых, как раз таки, вызвал нагрев активной зоны реактора. При этой температуре начнут плавиться стержни управления и защиты, а также, решетка, удерживающая твэлы. Возможный вариант процесса плавления изображен на рисунке 2.



1 – расплавленный материал; 2 – топливный стержень; 3 – вновь застывшие капли расплава: 4- расплавленные топливные стержни; 5 – стенка активной зоны; 6- твердая корка; 7 – неповрежденные топливные стержни (оболочки окислены); 8 – уровень водяной смеси; 9 – частички топливных таблеток и окисленной оболочки; 10 – поток излучения, идущий вверх; 11 – отклоненный паровой поток

Рисунок 2 – Последовательность плавления активной зоны [16].

Как видно из рисунка, первым делом начнут формироваться капельки расплава материалов активной зоны (рисунок 2а). Они, в свою очередь, начнут опускаться вниз по твэлам и застывать в нижней части (рисунок 2б), ухудшая поток теплоносителя. После чего, будут собираться в более объемные массы (рисунок 2в) и увеличиваясь в объеме, постепенно опустятся к низу активной зоны (рисунок 2г).

4. Далее, весь образовавшийся расплав материалов активной зоны

будет продвигаться ниже, пока не опустится на опорную плиту в нижней части активной зоны. Следующим этапом продвижения расплава вниз будет расплавление материалов опорной плиты. После чего, расплав окажется в нижней части корпуса реактора, в котором, как видно из рисунка 2, может находиться определенное количество воды. Данные обстоятельства могут привести к тому, что падение расплава в бассейн с водой, в нижней части корпуса реактора, приведет к возможному «паровому взрыву» и, вполне вероятно, разрушению корпуса реактора с выбросом радиоактивных веществ в помещение станции.

5. В случае отсутствия разгерметизации реактора, взаимодействие расплава с водой приведет к его фрагментации на дне корпуса. Если производить непрерывное охлаждение фрагментированного расплава в течение длительного времени, то можно добиться его захолаживания и локализации внутри корпуса реактора.

6. В случае же отсутствия непрерывного охлаждения, начнет образовываться бассейн расплава материалов активной зоны на дне корпуса реактора, который в конечном итоге проплавит корпус и окажется в подреакторной ловушке расплава АЭС. Ловушка расплава в свою очередь, должна разместить и ограничить движение расплава, до полной его локализации, тем самым, исключив выход радиоактивных материалов за пределы герметичного ограждения зоны локализации аварии [17].

1.2 Локализация расплава активной зоны при тяжелой аварии с проплавлением корпуса ядерного реактора

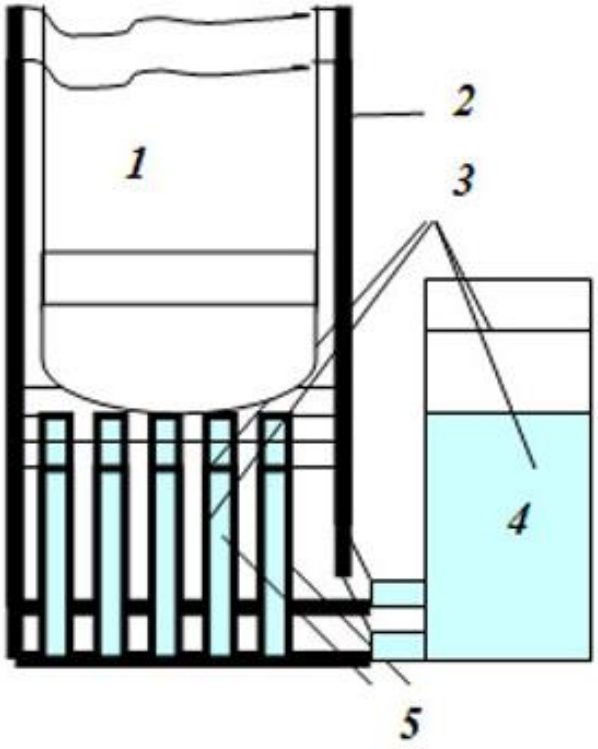
Одним из основных методов по управлению конечной стадией тяжелой аварией с расплавлением активной зоны и его выходом за пределы корпуса реактора является концепция удержания и охлаждения кориума вне корпуса реактора. Данная концепция отражается в установке под корпусом реактора специальных устройств локализации расплава или просто ловушек расплава с целью предотвращения повреждения герметичной оболочки контейнмента.

На первых этапах развития данной концепции предлагалось заполнить пространство под реактором водой, в которую будет попадать расплав в случае проплавления корпуса. Однако, вероятность парового взрыва при падении кориума в воду и, впоследствии, возможной разгерметизации подреакторного помещения, привели к отказу от данной концепции [18].

Следующим предложением было использование в подреакторном помещении цилиндрических каналов из керамического материала разного диаметра, полая часть которых заполнялась бы водой, для отвода тепла от поступившего кориума за счет свободной конвекции. Главным недостатком использования такого устройства являлись размеры этих каналов, которые по расчетам достигали бы порядка 400 метров, что являлось невозможным при строительстве АЭС [19].

Французские специалисты компании EDF предложили конструкцию устройства для охлаждения расплава. Данное устройство состоит из системы,

установленных вертикально, продольных охлаждающих трубок с пустым пространством между ними для увеличения поверхности теплоотдачи (рисунок 3). В случае аварии поступивший кориум будет заполнять пространство между трубок и охлаждаться теплоотводом с их поверхности, вода в трубки будет подаваться из бака с запасом воды. Однако данная конструкция устройства имеет недостатки, связанные со скоростью охлаждения расплава, что необходимо для предотвращения негативных явлений, связанных с образованием взрывоопасного водорода. Также возникают проблемы с герметичностью трубок, т.к. в случае их разгерметизации пространство под корпусом будет заполняться водой, что может создать риск паровых взрывов в случае порционного выхода расплава в устройство [19].



1, 2 – корпус и шахта реактора; 3 – объем, залитый водой; 4 – бак запаса воды; 5 – полости для размещения расплава.

Рисунок 3 – Ловушка, предложенная компанией EDF [19]

Немецкими инженерами была разработана конструкция подреакторной ловушки для реактора EPR (рисунок 4). Расплав кориума после проплавления корпуса реактора попадает в отсек модели ловушки с жертвенными материалами. После взаимодействия с жертвенными материалами и длительной выдержки, он орошается водой из подготовленного резервуара [19].

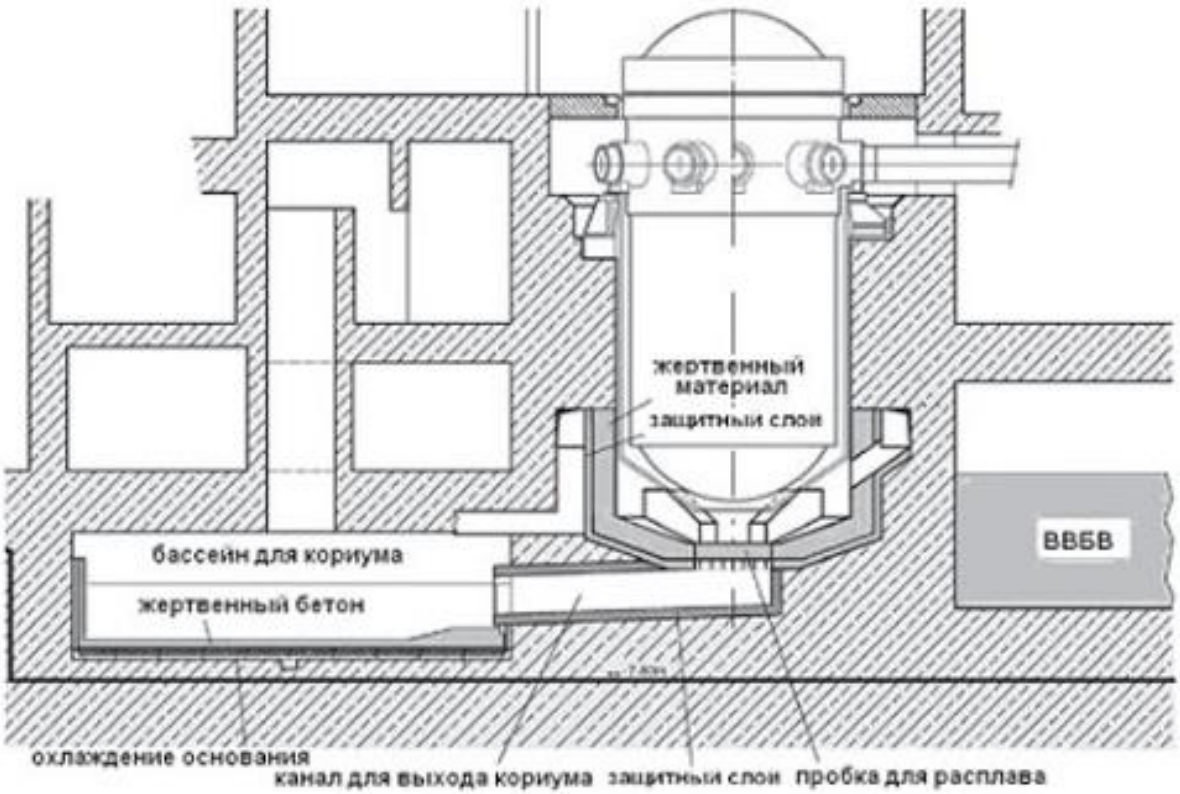
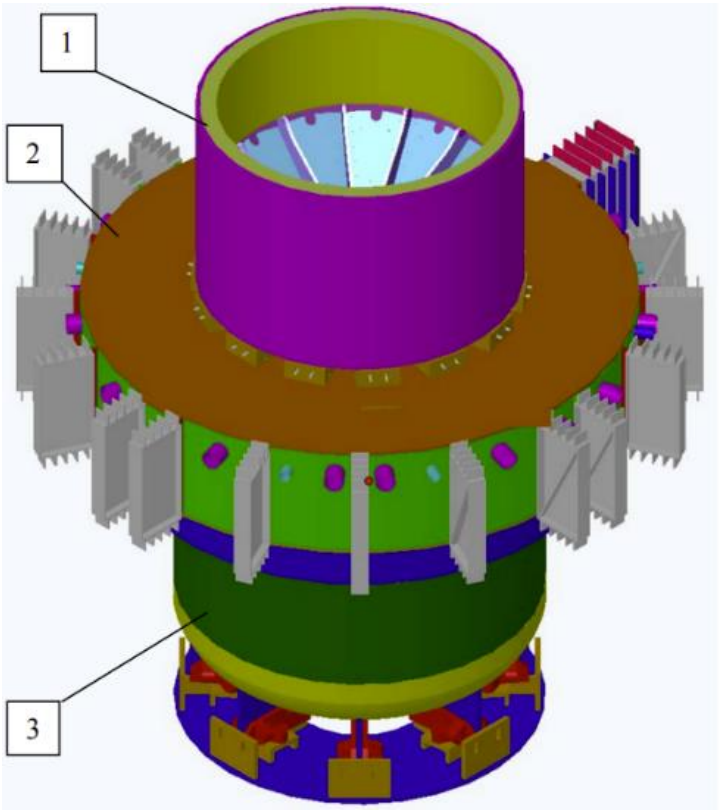


Рисунок 4 – Ловушка, разработанная для проекта реактора EPR [19]

В настоящее время одним из ключевых направлений локализации расплава активной зоны легководного ядерного реактора является использование ловушки тигельного типа (рисунок 5) (см., например, работы [20-36]), которая считается одним из перспективных и эффективных методов удержания и охлаждения кориума. Основной задачей таких ловушек является локализация процессов остаточного энерговыделения кориума и предотвращение его выхода за пределы ловушки.

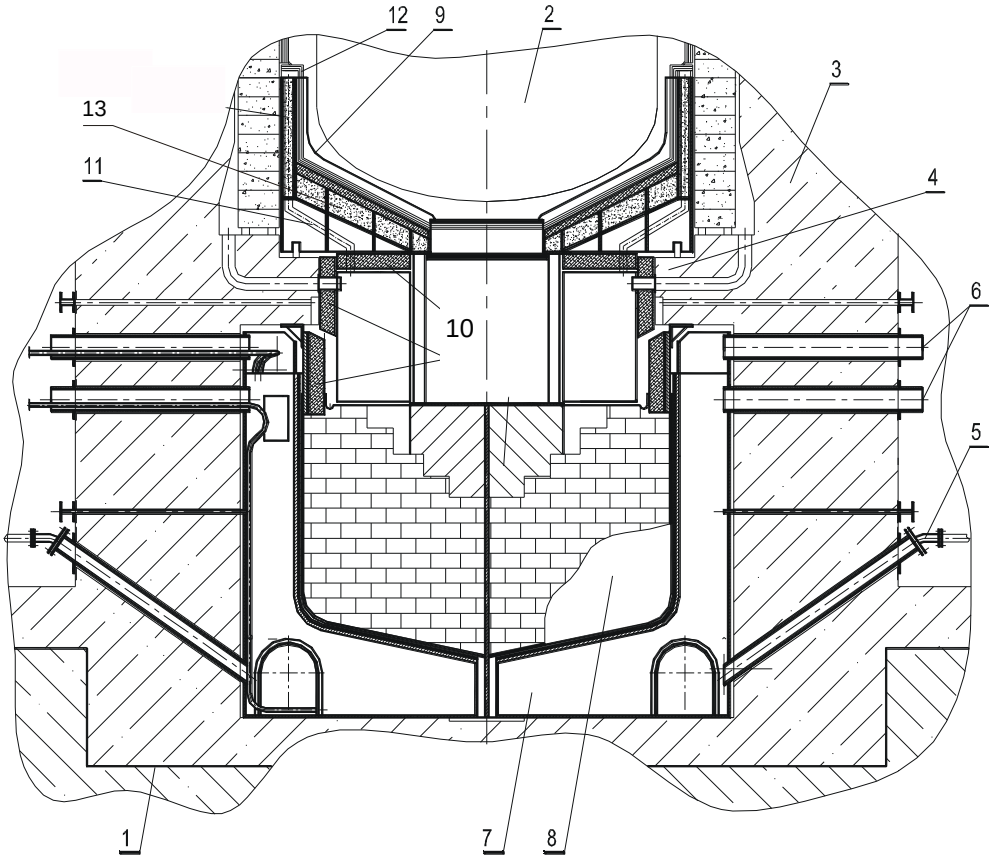


1 – нижняя плита; 2 – ферма-консоль; 3 – корпус УЛР.

Рисунок 5 – Устройство локализации расплава тигельного типа [20]

УЛР тигельного типа представляет собой стальной тигель-теплообменник, окруженный теплоизоляционными слоями, охлаждаемыми кольцевым бассейном [37-39]. Внутри устройства установлены блоки с жертвенным материалом для осуществления инверсии металлической и оксидной компонент кориума при взаимодействии с ним.

Впервые ловушки расплава тигельного типа была монтирована при сооружении китайской Тяньваньской АЭС с реакторами под давлением российского производства. Ловушка была установлена под днищем корпуса реактора. Ловушка расплава представляет собой водоохлаждаемый стальной корпус, образующий сосуд, заполненную специальными жертвенными материалами. Жертвенные материалы при взаимодействии с расплавом активной зоны должны изменять его состав и свойства, создавая условия для надежной работы ловушки. Охлаждение расплава происходит отводом тепла через оболочку стального корпуса, а также водой, подаваемой непосредственно на поверхность расплава [39]. УЛР Тяньваньской АЭС показано на рисунке 6.



1 – защитная оболочка; 2 – корпус реактора; 3 – шахта реактора; 4 – бетонная консоль; 5 – устройство для подвода теплоносителя; 6 – трубопроводы отвода теплоносителя; 7 – кольцевой секционный теплообменник; 8 – корзина; 9 – защитная ферма; 10 – теплоизолирующие панели; 11 – каналы воздушного охлаждения; 12 – тепловая изоляция; 13 – нижняя плита

Рисунок 6 – УЛР Тяньваньской АЭС [39]

Основные особенности ловушки расплава тигельного типа заключаются в следующем [38]:

- взаимодействие кориума с жертвенным материалом оптимизирует условия теплоотвода, сглаживает неопределенности, связанные с различными сценариями тяжёлой аварии;
- обеспечение инверсии металлической и оксидной компонент расплава до подачи воды на его поверхность;
- предотвращение возможности паровых взрывов при подаче воды на поверхность расплава.

Применимость ловушек расплава данного вида была обоснована большим количеством проведенных исследований. Результаты расчётных и экспериментальных исследований подтвердили, что кориум состоит из двух несмешивающихся компонент: металлической и оксидной. Металлическая компонента образуется в результате плавления стальных конструкций и корпуса реактора, а оксидная – в результате растворения топлива в расплаве металлического циркония и оксида циркония. Плотность оксидной

компоненты больше плотности металлической, что и является фактором к расслоению данных компонент в расплаве при совместном присутствии [38].

Также, стоит отметить, что кориум имеет температуру до 2800 °С, высокую концентрацию сильных восстановителей, при взаимодействии с водой генерирующих взрывоопасный водород и при взаимодействии с металлическими конструкциями снижая их механическую прочность.

1.3 Жертвенные материалы – основной элемент тигельной ловушки расплава

Для устранения вышеперечисленных проблем в ловушках расплава используются жертвенные материалы, предназначенные для снижения температуры поступившего в ловушку высокотемпературного расплава кориума и уменьшения его плотности для осуществления гравитационной инверсии металлической и оксидной компонент кориума с целью уменьшения выделения взрывоопасного водорода в ходе паро-металлических реакций. Вода не вступает в химические реакции с оксидной компонентой кориума, тем самым, снижая вероятность образования взрывоопасного водорода [40].

В связи с этим, к жертвенным материалам предъявляются достаточно серьезные требования касательно их физико-химических свойств для обеспечения работоспособности вышеперечисленных функций ловушек расплава. Интенсивное химическое взаимодействие жертвенных материалов с оксидной компонентой должно обеспечивать: во-первых, эффективное охлаждение системы; во-вторых, снижать плотность оксидной части, до ее инверсии с металлической частью кориума. Такие условия предотвращают фокусировку тепловых потоков на водоохлаждаемой поверхности корпуса устройства локализации расплава (УЛР) в области верхнего слоя расплавленной стали, создавая тем самым благоприятные условия для последующей подачи воды на поверхность расплава [41].

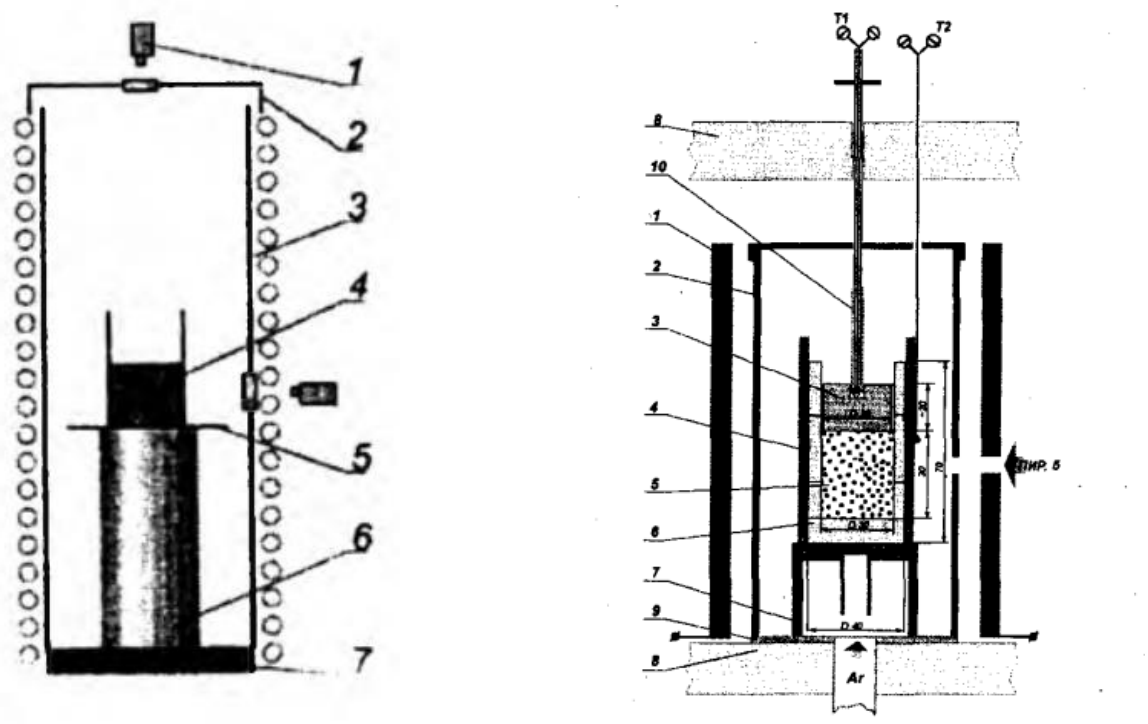
В первоначальном варианте в качестве жертвенного материала рассматривалась сталь, т.к. она уже присутствует в поступающем в УЛР расплаве, а также обладает функциональной эффективностью и экономической целесообразностью. Однако проведённые расчёты и эксперименты показали, что при использовании только металла в качестве жертвенного материала тепловая нагрузка на боковые охлаждаемые поверхности в зоне оксидной ванны расплава может превысить допустимые значения [42].

Дальнейший анализ возможных вариантов ЖМ ловушки расплава позволил ограничить круг кандидатных материалов оксидными соединениями. Например, в ходе проведения многочисленных исследований кандидатных материалов в качестве наполнителя ловушек расплава был рекомендован материал, состоящим из смеси легких оксидов железа Fe_2O_3 и алюминия Al_2O_3 [43, 44].

Для подтверждения функциональной пригодности разработанного жертвенного материала была проведена серия экспериментов по его

взаимодействию с металлической и оксидной частями кориума. Металлическая часть состояла из стали с содержанием циркония, а в качестве оксидной использовали расплав на основе системы UO_2-ZrO_2-Zr.

Экспериментальная часть работы включала исследование процессов взаимодействия расплава с разной степенью окисления циркония с легкоплавкими оксидами на основе системы Al_2O_3-Fe_2O_3. Эксперименты проводились на установках STF (Small Tungsten Furnace) в ГНИИ НПО «Луч», «Корпус» в РНЦ «Курчатовский институт» и «Расплав-2» в НИТИ [45]. Схемы экспериментальных установок STF и Корпус для проведения иследований предсталены на рисунке 7.



а)

1 - пирометр; 2 - экран; 3 - вольфрамовый нагреватель; 4 - образец; 5 - вольфрамовая фольга; 6 - вольфрамовая подставка; 7 - молибденовое основание

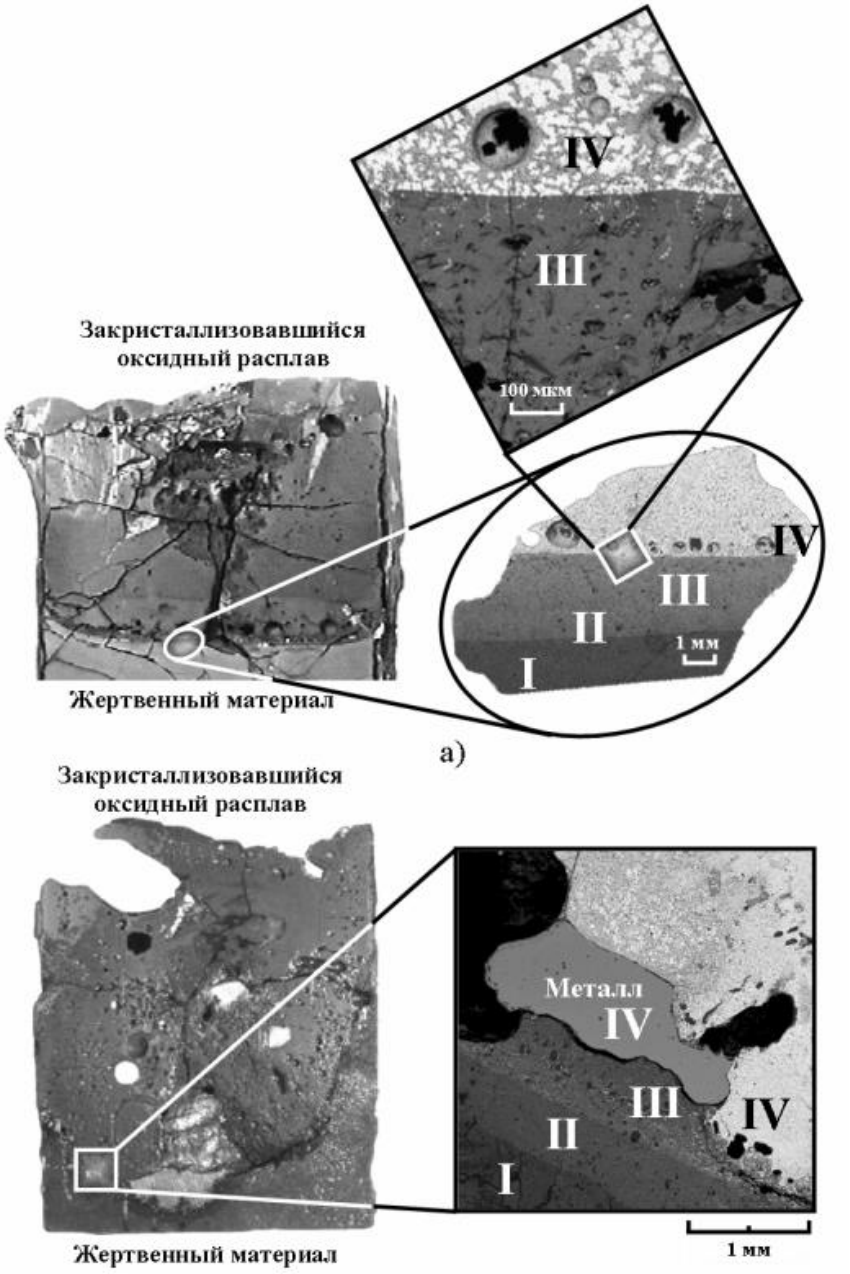
б)

1 - графитовый нагреватель; 2 – танталовый стакан; 3 - сталь; 4 - вольфрамовый тигель; 5 - загрузка кориума; 6 – ZrO_2 тигель; 7 - вольфрамовая подставка; 8 - углеволокнистая теплоизоляция (ТКМ); 9 - графитовый диск; 10 - чехол

Рисунок 7 – Схема установок STF (а) и Корпус (б) [45]

Эксперименты показали, что при взаимодействии оксидной части кориума с жертвенными материалами граница между слоями расплава представляла собой зону смешивающихся жидкостей до момента их кристаллизации. Результаты представлены на рисунке 8. В одном из экспериментов на границе этих слоёв наблюдалась серия пор, образованных пузырьками кислорода, выделившегося при разложении оксида железа. Авторы отмечают, что выделение кислорода происходило только в тех экспериментах, где расплав активной зоны содержал оксиды UO_2 и ZrO_2

(полностью окисленные компоненты), а в экспериментах с недоокисленными цирконием и ураном весь выделявшийся кислород вступал с ними в реакцию, способствуя их дальнейшему окислению [46].



а) взаимодействие жертвенного материала с полностью окисленной оксидной частью расплава активной зоны; б) взаимодействие жертвенного материала с недоокисленной оксидной частью расплава активной зоны.
I – зона образования термических трещин в жертвенном материале; II – зона спекания жертвенного материала; III – зона диффузии компонентов расплава в жертвенный материал; IV – зона взаимодействия расплавов, образованных компонентами жертвенного материала и имитаторов расплава активной зоны

Рисунок 8 – Взаимодействие жертвенного материала с оксидной частью расплава активной зоны [46]

Проведенные исследования показали перспективность использования предложенных материалов в качестве жертвенных в ловушке расплава Тяньванской АЭС. Эксперименты подтвердили эвтектический характер фазовых диаграмм, образуемых многокомпонентным расплавом активной зоны с Al_2O_3 и Fe_2O_3. Получено, что взаимное растворение жертвенного материала и расплава осуществляется со скоростью, достаточной для реализации инверсии оксидного и металлического слоев за время <1 ч.

Эффективность применения сплава Al_2O_3-Fe_2O_3 в качестве жертвенных материалов было подтверждено, но некоторые исследования показывают, что теплоотвод от кориума не оправдывается в необходимой мере из-за низкой теплопроводности жертвенных материалов (λ=0,5 Вт/м×К) [47]. Также было обнаружено, что выделение кислорода из жертвенных материалов будет создавать барьерный газожидкостный слой, препятствующий тепломассообмену. Эти обстоятельства могут привести к выходу системы за допустимые пределы благодаря теплу химических реакций и остаточному энерговыделению в кориуме.

Дальнейшие исследования в данном направлении были продолжены в настоящее время. Было установлено, что вышеописанные кандидатные жертвенные материалы, до процесса подачи воды на поверхность расплава, не способны существенно снизить выход из кориума радионуклидов в газовую фазу [48]. Данная проблема может быть решена с помощью введения в основную композицию ЖМ специальных добавок. В результате этих исследований было предложено несколько вариантов керамических жертвенных материалов в системе Fe_2O_3–Al_2O_3 с функциональными добавками SrO, CeO_2, Gd_2O_3, Eu_2O_3 [49, 50].

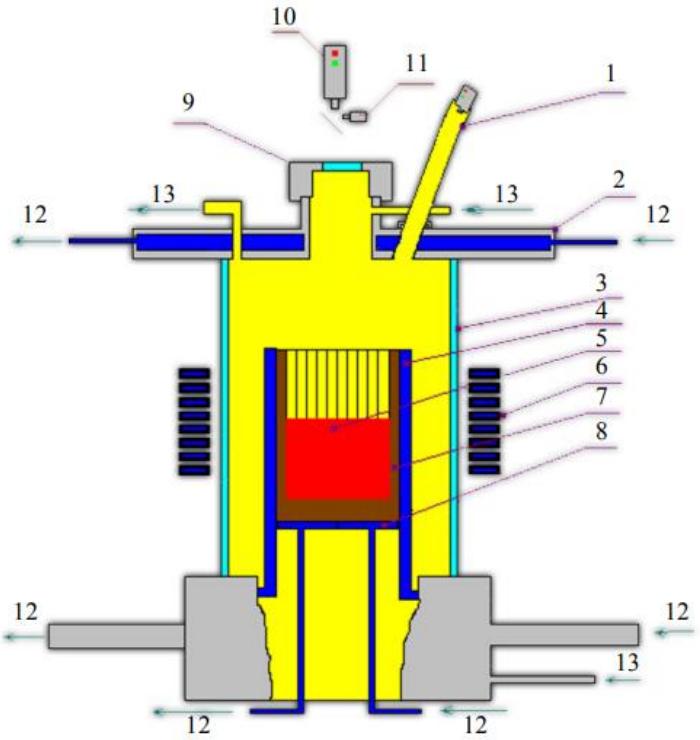
Следует отметить, что разработанные оксидные жертвенные материалы изготавливаются по керамической технологии и уже применяются в устройствах локализации расплава для АЭС с реакторами ВВЭР современных российских проектов. Однако в качестве альтернативы керамическому жертвенному материалу рассматривается бетонный жертвенный материал (БЖМ). Преимущество БЖМ заключается в более простой технологии производства и меньшей стоимости. Тем не менее, его использование в ловушках расплава ограничено из-за относительно высокого содержания воды в бетонных материалах, что снижает их эффективность [51].

Одним из примеров БЖМ служит, разработанный Санкт-Петербургским Государственным Технологическим Институтом, материал следующего состава масс (в %): $SrFe_{12}O_{19}$ (гексаферрит стронция) —75,4 (±7,5), Al_2O_3 –19,7 (±5,0), CaO — 4,9 (±1,5). Гексаферрит стронция является наполнителем, а оксиды алюминия и кальция - связующим БЖМ [52]. Образцы БЖМ изготавливались в два этапа. Сначала, методом твердофазного синтеза получали керамику на основе $SrFe_{12}O_{19}$. После чего, полученный материал смешивали с высокоглиноземистым цементом для создания БЖМ. Внешний вид образца и его микроструктура представлены на рисунок 9, где светлые области соответствуют высокоглиноземистому цементу.



Рисунок 9 – Вид образца жертвенного материала, его фрагмент и оптическое изображение макроструктуры [52]

Результаты исследований взаимодействия предложенного БЖМ с металлическим расплавом (с содержанием циркония и урана) кориума опубликованы в [53]. Было предположено, что протекающие процессы взаимодействия БЖМ с кориумом будут аналогичны процессам в экспериментальных исследованиях с керамическим ЖМ [54]. Экспериментальные исследования проводилось на установке «Расплав 3». Расплав получали методом индукционной плавки в холодном тигле. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 10.



1 — порт с видеокамерой для визуализации поверхности расплава; 2 — водоохлаждаемая крышка печи; 3 — кварцевая обечайка; 4 — секции тигля; 5 — расплав кориума; 6 — индуктор; 7 — бетонная защита; 8 — донный водоохлаждаемый калориметр; 9 — крышка с кварцевым окном печи; 10 — пирометр; 11 — видеокамера; 12 — вход и выход воды; 13 — вход и выход газовой атмосферы печи.

Рисунок 10 – Схема индукционной печи установки «Расплав-3» [54]

Результаты экспериментального взаимодействия металлического расплава кориума с БЖМ показали, что активное взаимодействие начинается только при достижении расплавом определённой температуры, получившей название температуры активации. То есть, пока температура расплава ниже температуры активации на границе взаимодействия формируется тугоплавкая корка, которая практически блокирует взаимодействие. При этом, как только температура расплава превышает температуру активации, корка разрушается, что приводит к интенсификации взаимодействия. Температура активации для БЖМ несколько ниже, чем для керамического ЖМ, а скорости взаимодействия находятся в хорошем соответствии.

В Южной Корее на установке VESTA, эксплуатируемой KAERI, были проведены аналогичные экспериментальные исследования БЖМ схожего состава [55]. Отличительной особенностью экспериментов являлся процесс получения металлического расплава кориума. Кориум получали в верхнем тигле, после чего он сливался в нижний тигель, на дне которого находился исследуемый БЖМ. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 11.

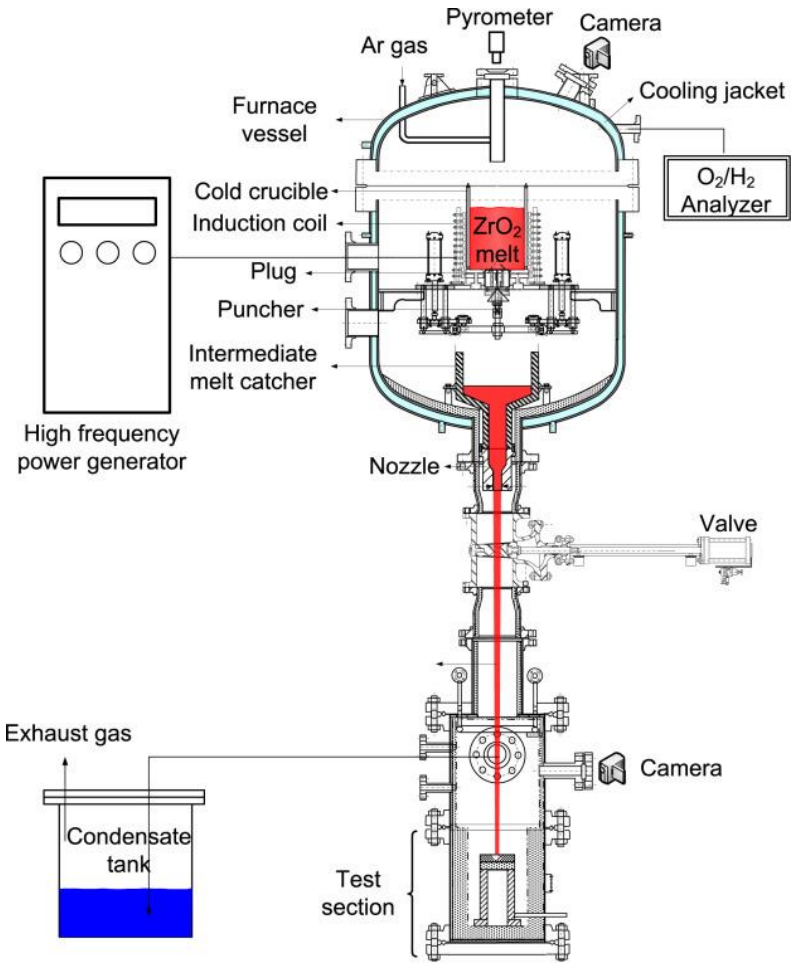


Рисунок 11 – Принципиальная схема установки VESTA [55]

В работе [56] описаны результаты разработки нового жертвенного материала на основе системы Fe_2O_3 –SrO–Al_2O_3 –CaO. Среди преимуществ данного материалы авторы отмечают повышение окислительных свойств, а также снижение интенсивности генерации водорода за счет уменьшения содержания воды по сравнению с другими видами БЖМ [57].

Таким образом, на сегодняшний день повышение эффективности локализации кориума при тяжёлых авариях остается актуальной задачей [58-62]. Эти задачи должны быть решены путем получения новых экспериментальных данных о процессах, протекающих при различных стадиях развития тяжелой аварии и выборе перспективных жертвенных материалов [63-67].

1.4 Выводы к главе 1. Постановка задач

Анализ литературных данных показал, что:

1. Вопросы безопасности эксплуатации АЭС остаются крайне актуальными, так как нельзя исключать риск возникновения аварийной ситуации. Опыт тяжелых аварий с расплавлением активной зоны, которые произошли на АЭС в Три-Майл-Айленде, Чернобыле и Фукусиме, показал, что безопасность эксплуатации ядерных энергоблоков является одним из основных факторов, определяющий конкурентоспособность атомной энергетики в настоящее время и направление ее развития в будущем;
2. На основании анализа литературных источников сделан вывод о том, что существует множество сценариев развития тяжелой аварии на АЭС. Один из таких сценарией развития тяжёлой аварии предполагает расплавление активной зоны реактора в случае невозможности подачи теплоносителя в активную зону для отвода излишек тепла. Основными причинами отказа системы охлаждения активной зоны являются потери внешних источников электроснабжения и отказа резервных дизель-генераторов (авария на АЭС Фукусима-1), либо утечка теплоносителя из контура системы охлаждения (авария на АЭС Три-Майл-Айленд);
3. Расплавление активной зоны приведет к образованию на дне корпуса бассейна расплавленного топлива и стали, которое впоследствии разрушит нижнюю часть корпуса с последующим выходом расплава в подреакторное помещение;
4. Одним из способов управления конечной стадией тяжёлой аварии с расплавлением активной зоны, при выходе расплава за пределы корпуса реактора, является концепция удержания и охлаждения кориума. Эта концепция реализуется в сооружении устройств локализации расплава (УЛР), или просто ловушек расплава;
5. В настоящее время одним из ключевых направлений локализации расплава активной зоны легководного ядерного реактора является использование УЛР тигельного типа. Она представляет собой стальной сосуд, в который поступает кориум, в случае проплавления корпуса реактора. Охлаждение образующейся в ловушке ванны расплава осуществляется за счёт

отвода тепла через оболочку стального корпуса к охлаждающей воде, а также с помощью подачи воды на поверхность расплава после завершения процесса гравитационной инверсии слоев кориума;

6. Кориум состоит из двух несмешивающихся компонент: металлической и оксидней. Плотность металлической части кориума меньше, чем оксидной, что приводит к расслоению этих расплавов при совместном наличии. В связи с этим предполагается, что при активном взаимодействии воды с металлической частью кориума может возникнуть критическая концентрация водорода, что потенциально приведёт к его детонации. Это означает, что не могут быть соблюдены условия водородобезопасности, что ставит под угрозу целостность контейнмента. Дополнительные сложности возникают из-за того, что согласно некоторым сценариям, выход кориума из корпуса реактора происходит не единой массой, а порциями в течение определённого времени. Если вода для охлаждения кориума подаётся сразу после попадания первой порции в ловушку, это может привести к образованию водного бассейна на поверхности расплава. В этом случае, при падении высокоэнергетического расплава в воду существует риск парового взрыва, что может разрушить УЛР, а также, подреакторную шахту с герметичной зоной;

7. Для устранения вышеперечисленных проблем в ловушках расплава используются жертвенные материалы, предназначенные для снижения температуры поступившего в ловушку высокотемпературного расплава кориума и уменьшения его плотности для осуществления гравитационной инверсии металлической и оксидной части кориума с целью уменьшения выделения взрывоопасного водорода в ходе паро-металлических реакций. В ходе проведения многочисленных исследований кандидатных материалов в качестве наполнителя ловушек расплава был рекомендован материал, состоящим из смеси легких оксидов железа Fe_2O_3 и алюминия Al_2O_3. Эксперименты подтвердили эвтектический характер фазовых диаграмм, формируемых многокомпонентным расплавом активной зоны с Al_2O_3 и Fe_2O_3. Было показано, что взаимное растворение жертвенного материала и расплава происходит с такой скоростью, которая позволяет осуществить инверсию оксидного и металлического слоев за время менее одного часа. В результате чего был синтезирован оксидный керамический жертвенный материал, состоящий из 67 % (по массе) Fe_2O_3 и 30 % Al_2O_3;

8. На сегодняшний день в качестве альтернативы керамическому жертвенному материалу рассматривается другие материалы. Например, бетонный жертвенный материал (БЖМ) может быть использован в ловушке расплава. В ходе экспериментальных исследований было подтверждена схожесть процессов взаимодействия с кориумом для бетонного и керамического ЖМ.

В связи с получением новой экспериментальной информации и расчетных оценок процессов, происходящих на внутрикорпусной и внекорпусной стадиях тяжелой аварии, а также с проектированием нового поколения реакторов, работы по созданию функциональных материалов, в том

числе жертвенных, остаются крайне актуальными и будут способствовать развитию атомной промышленности.

Для быстрой и надёжной локализации расплава требуется эффективный отвод тепла, выделяемого в объеме расплава кориума. Вода является наиболее подходящим теплоносителем для этой задачи, однако, чтобы избежать паровых взрывов и значительного выделения водорода, необходимо принятие дополнительных технических мер.

Одним из наиболее простых дополнительных вариантов ускорения взаимодействия кориума и жертвенного материала, снижении выделения кислорода в ловушке, а также повышения интенсивности теплоотвода от расплава является использование кипящего слоя металла над поверхностью керамического жертвенного материала.

В связи с чем, был предложен ЖМ из керамики (Al_2O_3) и свинцового слоя. Предполагается, что использование свинцового слоя позволит снизить время на активацию химических взаимодействий между коримом и ЖМ в ловушке, а также увеличить интенсивность их взаимодействия между собой. Дополнительно, свинец, имеющий температуры кипения и плавления ниже температуры существования кориума (~2500 °C) позволит обеспечить дополнительный эффективный теплоотвод от кориума за счет энергии, затрачиваемой на фазовый переход свинцового слоя в парообразное состояние. Преимущество расплавленного металла является отсутствие реакций образования водорода, а также низкая вероятность парового взрыва по сравнению с водой.

В связи с вышеизложенным, **целью настоящей диссертационной работы** является экспериментальное моделирование взаимодействия кориума с жертвенным материалом из оксида алюминия (Al_2O_3) со свинцовым слоем в условиях моделирования тяжелой аварии с расплавлением активной зоны и изучение структурно – фазового состояния кориума после взаимодействия.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Провести анализ процессов, происходящих при взаимодействии кориума легководного реактора с жертвенными материалами в ловушке расплава и разработать методику экспериментального моделирования их взаимодействия;
2. Выполнить экспериментальное моделирование взаимодействия кориума с жертвенным материалом, в условиях имитации остаточного энерговыделения в кориуме;
3. Провести исследование макро- и микроструктуры, элементного и фазового составов кориума после взаимодействия с жертвенным материалом из оксида алюминия (Al_2O_3) и свинцовым слоем.

ГЛАВА 2 ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОРИУМА С ЖЕРТВЕННЫМ МАТЕРИАЛОМ

Настоящая глава содержит информацию о базовом оборудовании и программном обеспечении для проведения экспериментального моделирования взаимодействия кориума с жертвенным материалом и оборудования для проведения сканирующей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ – ЭДС), рентгенофазового анализа (РФА), микроструктурного анализа методом оптической микроскопии после проведенного моделирования, а также измерения микротвердости керамического материала после взаимодействия.

2.1 Экспериментальная установка «Лава-Б»

В качестве базового оборудования для экспериментального моделирования (ЭМ) процессов взаимодействия прототипа кориума с подреакторной ловушкой расплава реактора с жертвенным материалом из оксида алюминия (Al_2O_3) с кипящим свинцовым слоем выбрана экспериментальная установка «Лава-Б».

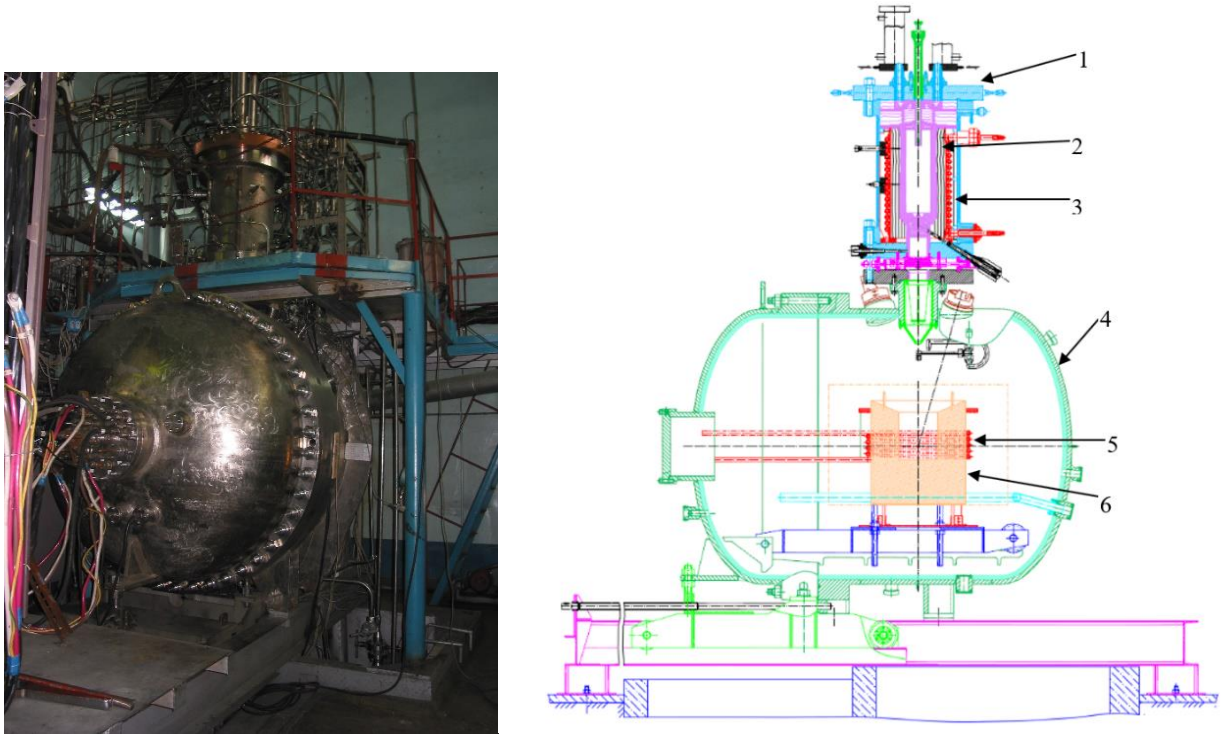
Экспериментальное моделирование является самым эффективным способом изучения процесса взаимодействия кориума с различными конструкционными элементами. При этом используемый в экспериментах прототип кориума хоть и идентичен по составу реальному кориуму, но не генерирует остаточное тепло. Следовательно, существенным отличием прототипа и реального кориума является то, что первый не является источником тепла, то есть в прототипе кориуме отсутствует самоподдерживающийся радиоактивный распад [68].

Таким образом, для достижения максимально приближенных условий моделирования реальным, необходимо учитывать уровень энерговыделения в расплаве, а также, соответствие состава прототипа кориума. Следовательно, устройство, обеспечивающее ввод энергии в расплав прототипа, должно моделировать реакцию деления как по величине, так и по характеру ее распределения в объеме кориума.

Среди различных экспериментальных комплексов, позволяющих проводить такие исследования конечной стадии тяжелой аварии с расплавлением активной зоны, выделяется установка «Лава-Б», предназначенная для решения широкого спектра задач с прототипом кориума (далее *кориум*) (рисунок 12), разработанная и эксплуатируемая «Институтом атомной энергии» Национального ядерного центра Республики Казахстан [69, 70]. «Лава-Б» включает в себя два основных функциональных узла:

1. Электроплавильная печь (ЭПП), для получения расплава кориума массой до 60 кг и максимальной температурой до 3100 К;

2. Устройство приема расплава (УПР), где устанавливается экспериментальная секция для моделирования взаимодействия исследуемых материалов с кориумом, в условиях имитации остаточного энерговыделения.

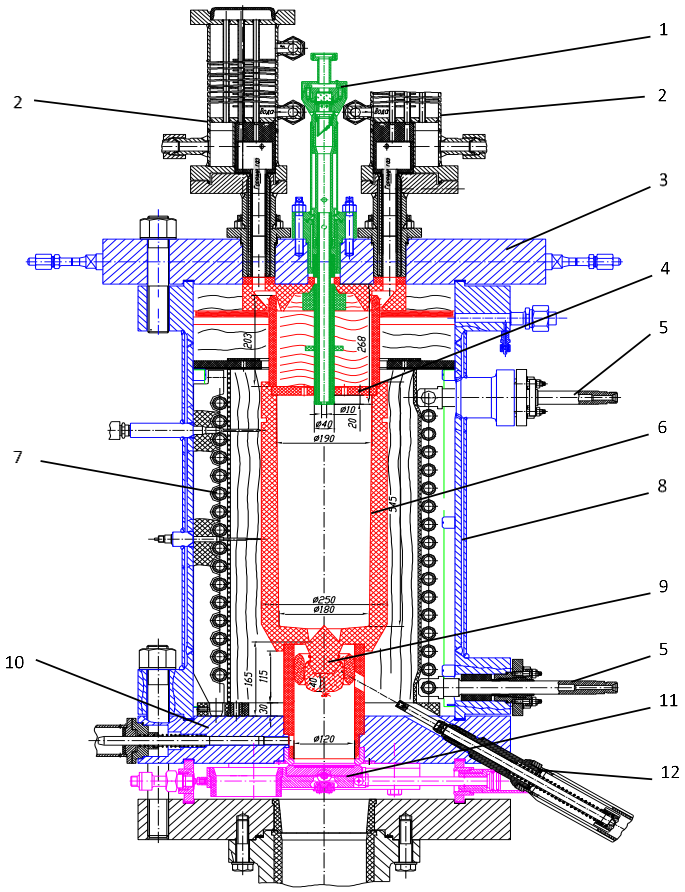


1 – ЭПП (электрическая плавильная печь), 2 – тигель графитовый,
3 – индуктор ЭПП, 4 – УПР (устройство приема расплава), 5 – индуктор УПР,
6 – бетонная ловушка.

Рисунок 12 – Внешний вид и схема установки «Лава-Б»

2.1.1 Электрическая плавильная печь

ЭПП установки «Лава-Б» состоит из корпус плавильной печи, плавильной камеры, шиберного затвора, для отсечения сливного канала между ЭПП и УПР установки, устройства для разрушения пробки тигля, закрывающей сливное отверстие и узла для установки пирометра, предназначенного для отслеживания температуры расплава. ЭПП индукционного типа предназначена для подготовки расплава кориума путем плавления шихты из тугоплавких материалов (UO_2, ZrO_2, Zr), после чего, готовый расплав сливается в экспериментальную секцию в УПР. Схема конструкции ЭПП и ее функциональных узлов представлена на рисунке 13.



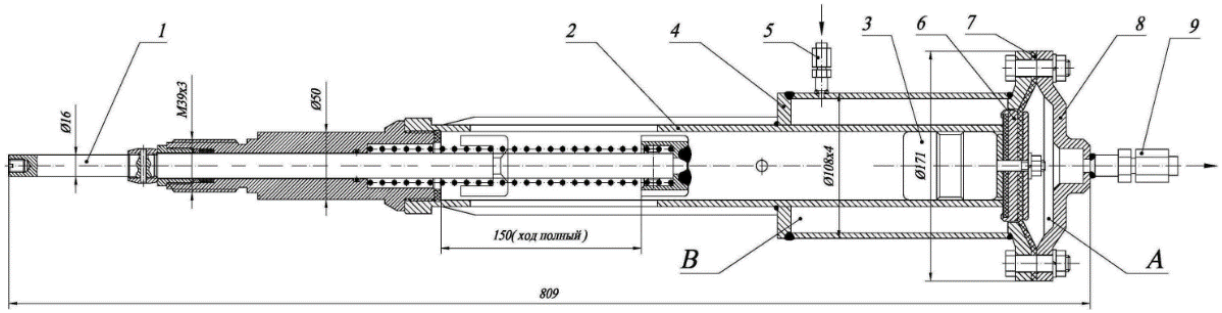
1 – узел визирования пирометра; 2 – теплообменник; 3, 10 – медные фланцы; 4 – крышка тигля; 5 – токоподвод; 6 – тигель; 7 – индуктор; 8 – корпус ЭПП; 9 – пробка тигля; 11 – затвор; 12 – механизм разрушения пробки

Рисунок 13 – Конструктивная схема ЭПП

Для получения расплава кориума в ЭПП установлен 16-витковый охлаждаемый индуктор, выполненный из медной трубы диаметром 30×5 мм. Высота индуктора составляет 646 мм, а внутренний диаметр витка – 385 мм.

Устройство для разрушения пробки тигля, закрывающей сливное отверстие, установлено в днище ЭПП. Конструктивная схема устройства разрушения пробки представлена на рисунке 14. Принцип работы устройства пневмомеханический и заключается в следующем:

- газовый поток приводит в движение боек (3);
- боек перемещает ударник (1);
- ударник (1) наносит удар по графитовой пробке, разрушая её;
- пружина, сжимающаяся при движении бойка, разжимается и возвращает ударник в исходное положение.



1 – ударник; 2 – направляющий цилиндр; 3 – боек; 4 – корпус; 5 – штуцер подачи газа в полость В; 6 – клапан; 7 – эластичная диафрагма; 8 – крышка корпуса; 9 – штуцер для подачи газа в полость А

Рисунок 14 – Конструктивная схема устройства разрушения пробки

Расплав кориума непосредственно получают в тигле из мелкозернистого изостатического графита, который находится в центральной части ЭПП. Конструктивная схема графитового тигля с размерами представлена на рисунке 15.

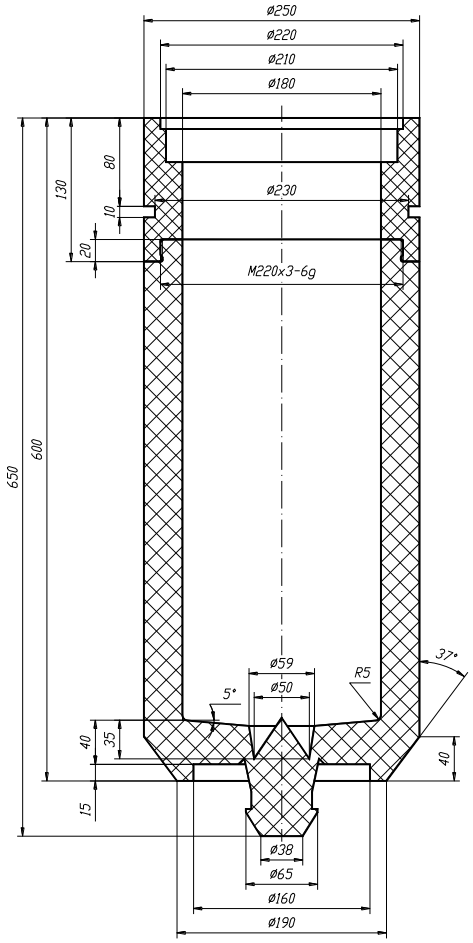
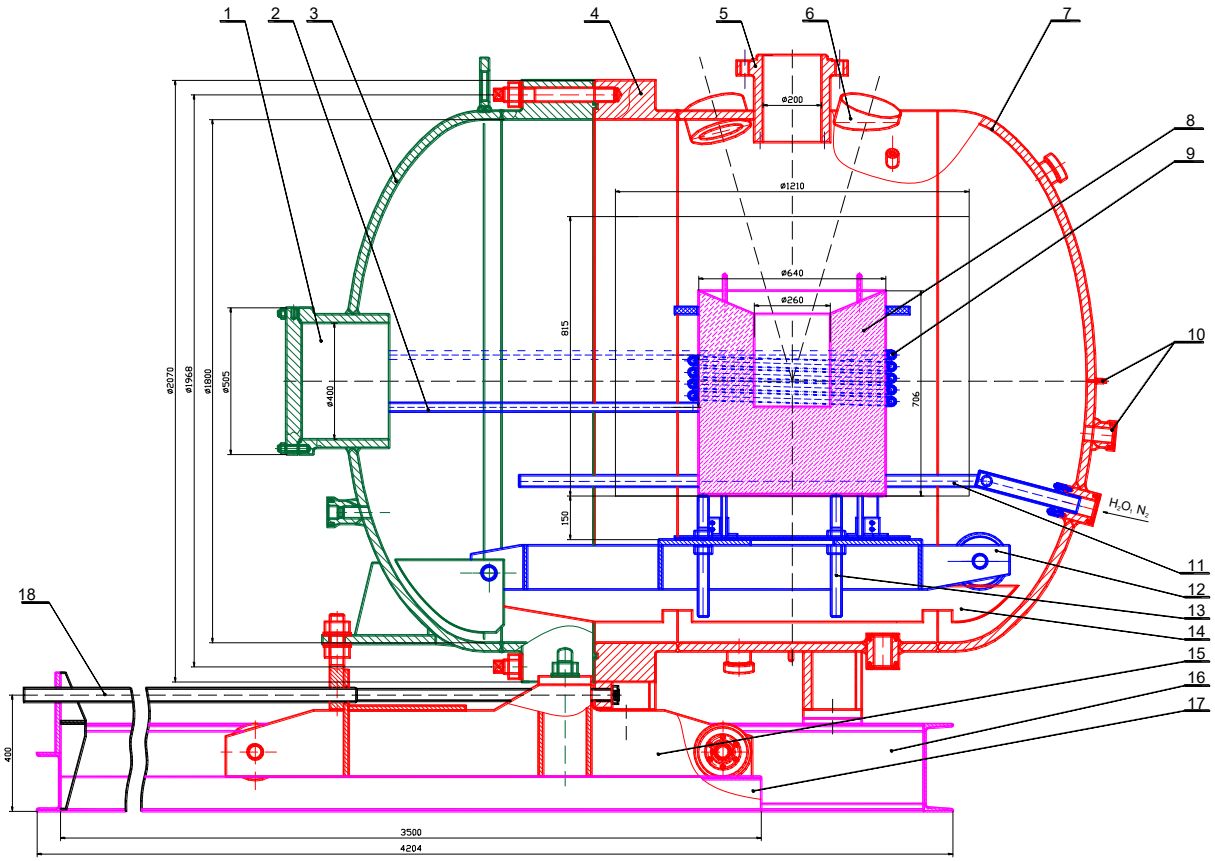


Рисунок 15 – Конструктивная схема плавильного тигля

2.1.2 Устройство приема расплава

Конструкция основных частей УПР показана на рисунке 16.



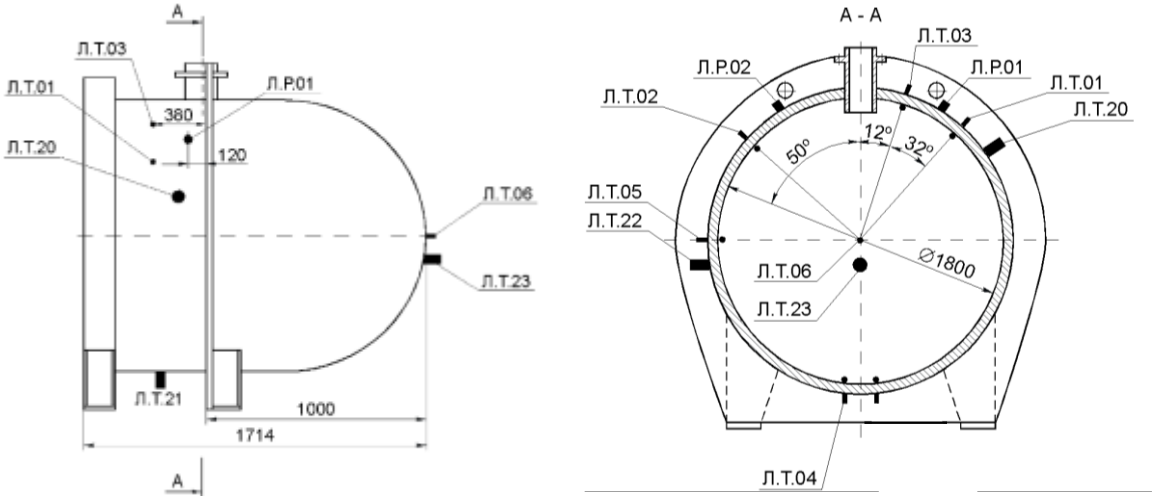
1 - технологический люк; 2 - токоподвод индуктора; 3 - съемная крышка, 4 - силовой сосуд, 5 - верхний фланец, 6 - смотровое окно, 7 - сварное дно, 8 - бетонная ловушка, 9 - индуктор, 10 - технологические соединения, 11 - парогазопровод; 12 – устройство передвижения ловушки, 13 - основной винт, 14 - рельс, 15 - крышка грузовика, 16 - опорная рама, 17 - крышка тележки рельса, 18 – шпиндель

Рисунке 16 – УПР установки «Лава-Б»

УПР установки «Лава-Б» представляет собой цилиндрический сосуд с двумя эллиптическими днищами. Корпус УПР изготовлен из немагнитной нержавеющей стали. В верхней части УПР имеется горловина с диаметром проходного сечения 200 мм, на которую устанавливается ЭПП. В верхней части УПР имеются четыре оптических окна для возможности установки различных приборов бесконтактного измерения температуры сливаемого с ЭПП расплава кориума. Съемное эллиптическое днище перемещается в горизонтальном направлении с помощью специального устройства, состоящего из рельсовой тележки, двух направляющих рельсов и винтового механизма для перемещения тележки с днищем. К днищу подсоединена платформа, на которую устанавливается исследуемое экспериментальное устройство. Платформа установлена на опорные ролики и также перемещается

в горизонтальном направлении вместе со съемным днищем. В результате платформа с экспериментальным устройством полностью выходит из внутренней полости УПР, что позволяет выполнять операции по перегрузке экспериментального устройства с помощью электрической тали, находящейся в экспериментальном боксе. В съемном днище предусмотрен технологический люк диаметром 400 мм.

В корпусе УПР установки «Лава Б» предусмотрены технологические лючки и приварные штуцеры, предназначенные для установки средств измерения различных параметров. На крышках технологических лючков можно разместить одновременно несколько датчиков. Схема расположения средств измерений в УПР установки «Лава-Б» представлена на рисунке 17. В нижней части днища располагаются три герморазъема, обеспечивающие вывод сигналов от термопар.



Л.Т.01 – Л.Т.06 – термопары типа ХА; Л.Р.01, Л.Р.02 – датчики давления;
Л.Т.20 – Л.Т.23 – датчики теплового потока

Рисунок 17 – Схема расположения средств измерений параметров в устройстве приема расплава

2.2 Экспериментальное оборудование для структурно – фазовых исследований

Структурно – фазовые исследования кориума после взаимодействия с жертвенным материалом на основе оксида алюминия с кипящим свинцовым слоем были проведены методами оптической микроскопии, СЭМ-ЭДС и рентгенофазового анализов на базе научных лабораторий ИАЭ НЯЦ РК.

Перед проведением исследований образцы проходили процедуру пробоподготовки. Для пробоподготовки использовался прецизионный отрезной станок «GHS-5000» с алмазными отрезными дисками толщиной около 1 мм, шлифовально-полировочная машина LaboPol-25 и просмотровый микроскоп для контроля результатов шлифования.

Для изучения макроструктуры и микроструктуры срезов образцов использовался оптический микроскоп SOPTOP ICX4IM со встроенной фотокамерой. Порядок работы на микроскопе заключался следующим образом:

- предварительное наблюдение при малом увеличении (увеличением объектива 5×) с одновременным фотографированием всей поверхности шлифа для оценки общей макроструктуры и построения макроизображения в отраженном свете;

- детальные наблюдения при более высоких увеличениях в определенных областях шлифа (с использованием объективов увеличения 10× и 50×) с одновременным фотографированием характерных микроструктур.

СЭМ-ЭДС - анализ был проведен с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMH (TESCAN). В характерных областях выполнялась запись рентгеновского флуоресцентного спектра с помощью энергодисперсионного спектрометра Oxfford Inca X-Act и определение интегрального элементного состава области. Для уточнения распределения элементного состава в микроструктуре выполнялось картирование спектра с последующим анализом и построением карт распределения элементного состава.

Съемка рентгеновских дифрактограмм образцов производилась на дифрактометре Empyrean в режиме работы детектора PIXcel1D (сканирующий линейный детектор). Рентгеноструктурный анализ шлифов проводился в дифрактометрической системе Empyrean в 2 theta геометрии. Рентгенографирование в исследованиях выполнено в однотипных условиях с расхождением первичного пучка 1°, антирассеивающей щелью 2°, щелями Соллера на падающем и отраженном излучении 1,5°, маской ширины пучка 15 мм. Такие условия съемки позволяют получать дифрактограммы по всей ширине образцов с размерами областей рентгенографирования вдоль исследуемого направления от 8,5 мм в области углов 2 тэта 30° до 4,5 мм в области углов 70°. Обработка дифрактограмм проводилась посредством программы для обработки и поиска «HighScore» [71].

Для выявления изменений структуры, которые могли бы повлиять на прочность жертвенного материала выполнялись исследования изменений прочностной характеристики ЖМ, такой как микротвердость по Виккерсу. Измерения микротвердости проводились на автоматическом микротвердомере Qness с нагрузкой на инденторе 200 граммов (HV0.2). Размеры диагоналей отпечатков составляли величину порядка 15 мкм, что позволяло производить измерения размеров диагоналей с точностью порядка 1 мкм. Измерения проводились сериями по 21 измерению для каждой исследуемой области.

2.3 Особенности моделирования в ANSYS

В настоящей диссертационной работе для достижения поставленной цели и задач выполнялись теплофизические расчеты с использованием современного комплекса Ansys Fluent [72]. Ansys Fluent предлагает широкий выбор физических моделей для описания многофазных течений, турбулентности, теплообмена, химических реакций и тд. в различных процессах.

Ansys Fluent для компьютерного моделирования различных физических процессов использует численный метод конечных элементов. Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой эффективный численный метод решения инженерных и физических задач. Метод конечных элементов основан на разделении исследуемый области на конечное множество контрольных элементов. При этом в каждом контрольном элементе решаются уравнения путем объедения всех составных уравнений в систему алгебраических уравнений [73, 74].

Теплообмен в расчётных моделях в среде Ansys описывается системой дифференциальных уравнений, состоящей из уравнения энергии, уравнения движения, уравнения неразрывности и условиями однозначности (начальными и граничными условиями) с большим количеством переменных [75]:

При наличии тепловыделения в контрольном элементе и радиационного теплопереноса уравнение энергии имеет вид:

$$\rho c \frac{Dt}{D\tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v + div q_r, \qquad (1.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; с – удельная теплоемкость;

ρ – плотность;

q_v - интенсивность внутренних источников тепла;

$div q_r$ – дивергенция вектора излучения (поток вектора через замкнутую поверхность объема, отнесенный к величине этого объема).

Уравнение неразрывности в системе дифференциальных уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w_z)}{\partial z} = 0, \qquad (1.2)$$

где w_x, w_y, w_z – компоненты скорости движения среды;

В тоже время, система дифференциальных уравнений имеет бесконечное множество решений. Выделить из них конкретное решение

можно заданием условий однозначности (краевые условия). Программа Ansys определяет следующие граничные условия однозначности:

Граничные условия I рода (условия Дирихле) – задаются распределения температуры по поверхности тела во времени $T(x,y,z,\tau) = \varphi(x,y,z,\tau)$. Обычно условие используется для идеализированного описания реальных процессов в оценочных расчетах;

Граничные условия II рода (условия Неймана) – на границе задается плотность теплового потока как функция координат и времени $-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \Psi(x,y,z,\tau)$;

Граничные условия III рода – задается плотность теплового потока конвекции на границе как функция температуры поверхности тела и температуры окружающей тело среды в виде $-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha_к(t_c - t_ж)$, где $\alpha_к$ – коэффициент теплоотдачи;

Граничные условия IV рода – задают условия на границе контакта двух сред с разными теплофизическими свойствами. Если на границе нет выделения или поглощения тепла, то обе среды имеют одинаковые температуры и тепловые потоки. Если на границе идут процессы с выделением или поглощением тепла, например, при фазовых превращениях, то в первое уравнение вводятся величины соответствующих потоков тепла.

Таким образом, программа Ansys Fluent сочетает в себе универсальность алгоритмов решения различных краевых задач с эффективной компьютерной реализацией вычислений. Последовательность действий при работе с Ansys fluent кратко можно описать следующим образом:

1) Создание компьютерной геометрической модели объекта исследования;
2) Создание сеточной модели (разбиение модели на контрольные элементы) расчетной области;
3) Создание граничных условий и расчётной модели путём дополнения сеточной модели расчётными условиями;
4) Непосредственное проведение расчета;
5) Анализ полученных результатов.

2.4 Выводы к главе 2

1. В качестве базового оборудования для проведения экспериментального оборудования взаимодействия кориума с кандидатным жертвенным материалом использована установка « Лава-Б», позволяющая соблюсти все необходимые критерии соответствия, при моделировании тяжелой аварии, для получения качественных экспериментальных данных;

2. Оборудование для проведения материаловедческих исследований позволяет с большой точностью определить структурно – фазовое состояние исследуемых образцов;

3. Для проведения компьютерного моделирования изучаемого взаимодействия кориума с жертвенным материалом ловушки расплава

легководного реактора будет применена программа Ansys Fluent. Использование данной программы позволит получить необходимые данные для обоснования возможности проведения дальнейших экспериментальных исследований предложенного жертвенного материала.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ КОРИУМА ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ НАГРЕВА

Настоящая глава содержит результаты теплового расчета по выбору оптимальной системы нагрева для имитации остаточного энерговыделения в кориуме и результаты проведенных калибровочных экспериментов по определения максимального КПД индукционного нагревателя УПР для имитации остаточного энерговыделения в кориуме, а также, результаты экспериментальных исследований по возможности формирования бассейна кориума непосредственно в экспериментальном устройстве в УПР установки «Лава-Б».

Результаты исследований, приведенные в данном разделе, опубликованы в работах [96, 99, 107].

3.1 Остаточное энерговыделение в кориуме

Остаточное энерговыделение ядерного топлива является следствием радиоактивного распада накопленных продуктов деления и актиноидов даже после остановки цепной реакции деления, что создает ряд технических сложностей при обеспечении постоянного теплоотвода как при нормальной остановке реактора, так и в случае аварийной ситуации, а также при хранении ОЯТ [76, 77].

Мощность остаточного энерговыделения определяется несколькими формулами, из которых наибольшее распространение получила формула Вэя - Вигнера [78]. Согласно этой зависимости, мощность остаточного энерговыделения уменьшается с течением времени по закону:

$$\frac{W_{\delta,\gamma}}{W_0} = 6{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot [\tau_c^{-0.2} - (\tau_c + T)^{-0{,}2}] \,, \quad (1.3)$$

где $W_{\delta,\gamma}$ - мощность остаточного тепловыделения реактора через время $\boldsymbol{\tau_c}$ после его остановки;

W_0- мощность реактора до остановки, на которой он работал в течение времени **T.**

На начальном этапе после остановки реактора, когда $\tau_c \ll T$, можно использовать упрощённую зависимость:

$$W_{\delta,\gamma} = 6{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot W_0 \cdot \tau_c^{-0{,}2} \quad (1.4)$$

Графическая интерпретация зависимости (1.4) представлена на рисунке 18.

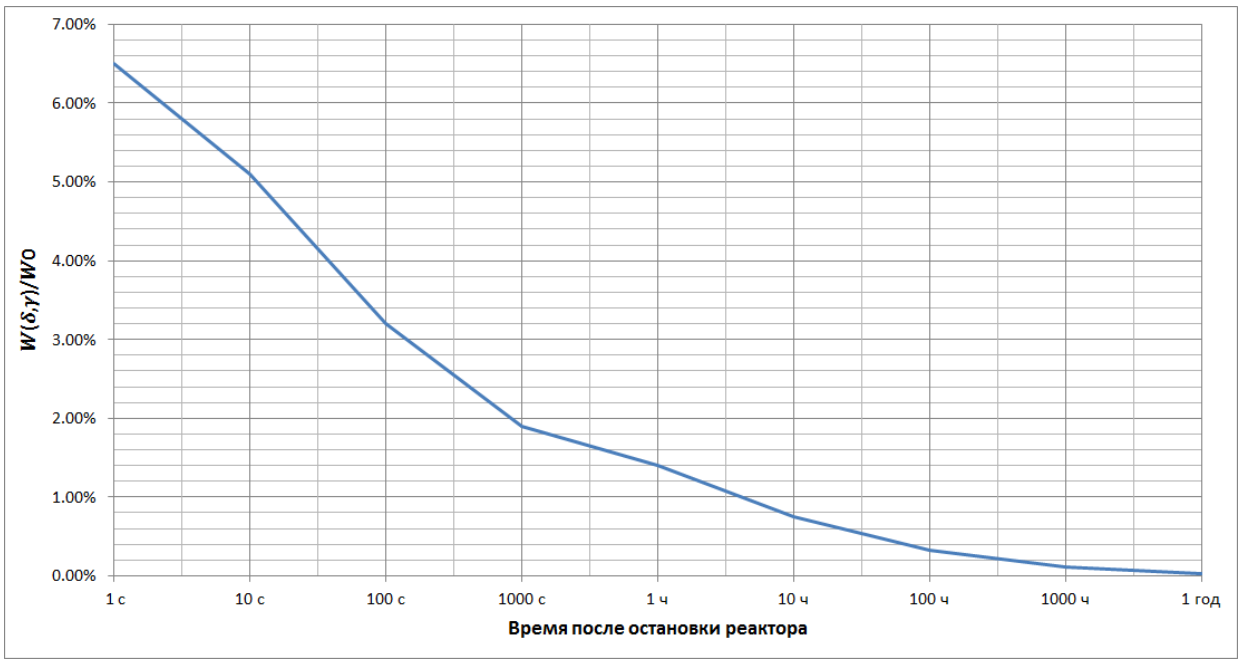


Рисунок 18 – Отношение интенсивности остаточного энерговыделения к номинальной мощности реактора

На рисунке 18 видно, что даже спустя некоторое время после остановки реактора в ядерном топливе будет выделяться тепло. Так, после остановки реактора через 1 час мощность остаточного энерговыделения составит около 1,4–1,5 % от номинальной мощности реактора. Если применить данную зависимость к наиболее распространенному реактору ВВЭР – 1000, то через 1 час после остановки реактора, мощность остаточного энерговыделения составит ~ 45 МВт.

Согласно наиболее вероятному сценарию развития тяжелой аварии в реакторе типа ВВЭР в случаи потери внешних и резервных источников электроснабжения через 5,5 часов после обесточивания станции начинается проплавление днища корпуса реактора и образование отверстия в днище корпуса и выход кориума в подреакторное помещение [79].

Учитывая формулу (1.4) и то, что загрузка реактора ВВЭР-1000 топливом составляет 66 т [80], можно оценить величину остаточного энерговыделения в кориуме в момент его выхода в ловушку расплава. Данная величина составляет 26,96 МВт или 0,41 кВт/кг.

Таким образом, экспериментальное устройство, обеспечивающее процесс имитации остаточного энерговыделения, должно вводить не менее 0,41 кВт/кг в расплав прототипа кориума для максимального приближения данного процесса к реальному. Установка «Лава-Б» способна получать до 60 кг прототипа кориума при проведении экспериментов. Это означает, что при максимальном количестве прототипа кориума в ловушке, индукционный нагреватель должен обеспечивать подведение 24,6 кВт полезной мощности для осуществления процесса имитации остаточного энерговыделения.

3.2 Моделирование процесса остаточного энерговыделения

До настоящего времени, в рамках различных программ на установке «Лава-Б» было выполнено несколько исследовательских работ, связанных с экспериментами по изучению взаимодействия кориума с конструкционными элементами ядерного ректора, корпуса реактора, оболочки, а также с так называемыми жертвенными материалами устройств локализации расплава активной зоны реактора АЭС [81-83].

В зависимости от объекта и целей исследования на установке «Лава-Б» применялись как индукционный, так и плазмотронный способ нагрева кориума в качестве метода имитации остаточного энерговыделения [84]. Для обеспечения требуемого качества проводимых исследований необходимо изучение процесса нагрева расплава кориума в экспериментальной секции данными методами, а также произвести их сравнение для обоснования наиболее оптимального метода имитации остаточного энерговыделения при физическом моделировании ситуации внекорпусной тяжелой аварии на АЭС.

Наиболее эффективным вариантом, позволяющих рассмотреть два метода имитации остаточного энерговыделения с минимальными затратами, является метод компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование теплофизических процессов нагрева расплава в экспериментальной секции позволяет:

1) Предварительно оценить температурные поля, установившееся в процессе нагрева расплава кориума в экспериментальной ловушке расплава при заданном режиме нагревательного устройства. В том числе с целью недопущения нагрева элементов экспериментальной секции сверх допустимых температур.

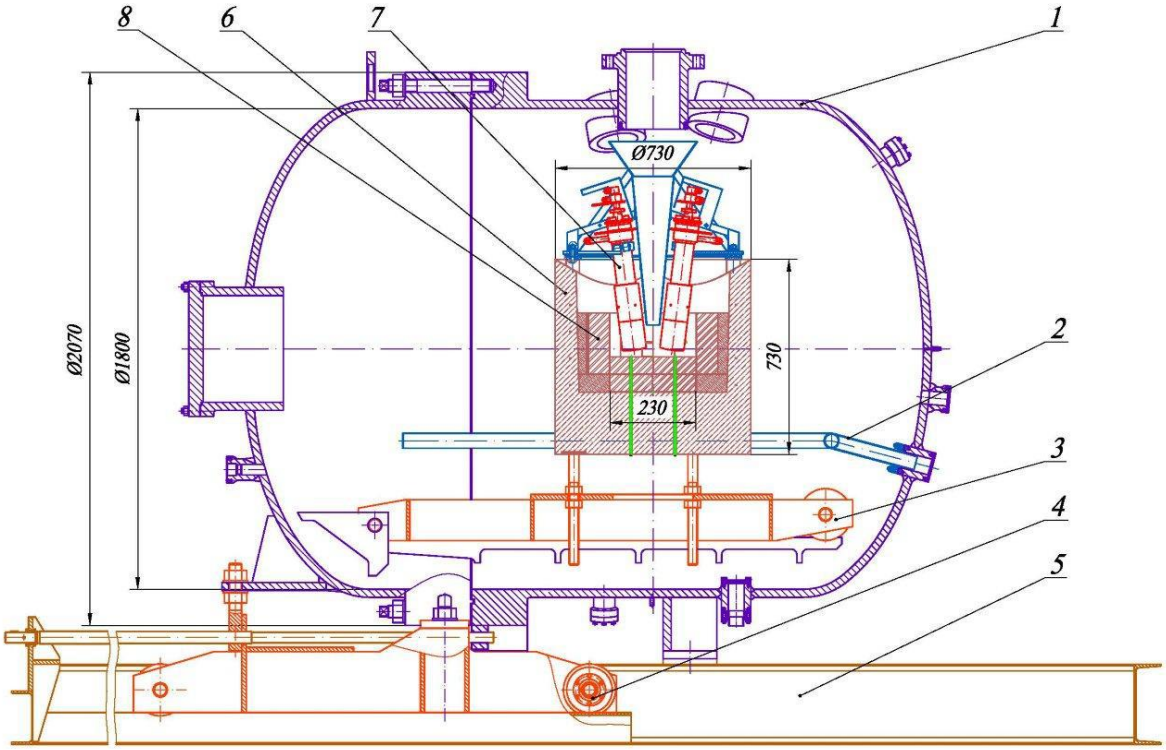
2) Оценить характеристики нагревательного устройства, необходимые для установления необходимого температурного поля в конкретном эксперименте.

3) Провести анализ теплофизический процессов, происходящих в экспериментальной секции, используя результаты компьютерного моделирования и измеренные данные натурного эксперимента.

Таким образом, для получения параметров системы нагреватель-расплав, методом компьютерного моделирования будут рассмотрены индукционный и плазмотронный методы нагрева.

Для достижения данной цели в работе моделируется экспериментальная ситуация, когда расплав кориума слит в экспериментальную ловушку расплава для осуществления его взаимодействия с конструкционными элементами. Расчеты теплового состояния теплофизической модели были выполнены в программе ANSYS [85].

На рисунке 19 представлена принципиальная схема экспериментальной секции установки «Лава-Б» с плазмотронным нагревателем [86]. Принципиальная схема экспериментальной секции установки «Лава-Б» с индукционным нагревателем была показана ранее на рисунке 16.



1 – емкость УПР; 2 – парогазопровод; 3 - устройство передвижения ловушки; 4 – тележка; 5 – рама; 6 – ловушка бетонная; 7 – плазмотрон; 8 – огнеупорные блоки

Рисунок 19 – Принципиальная схема установки «Лава-Б» с плазмотронным нагревателем

Используемая при расчетах теплофизическая модель создавалась на основе схемы специальной экспериментальной ловушки расплава ранее проведенных экспериментов на установке «Лава-Б», на которой использовался индукционный нагреватель в качестве метода имитации остаточного энерговыделения. Схематично ловушка показана на рисунке 20. Что касается теплофизической модели плазмотронного нагрева, то она была создана аналогично модели с индукционным нагревом с небольшими изменениями в схеме, учитывающие наличие плазмотронных нагревателей.

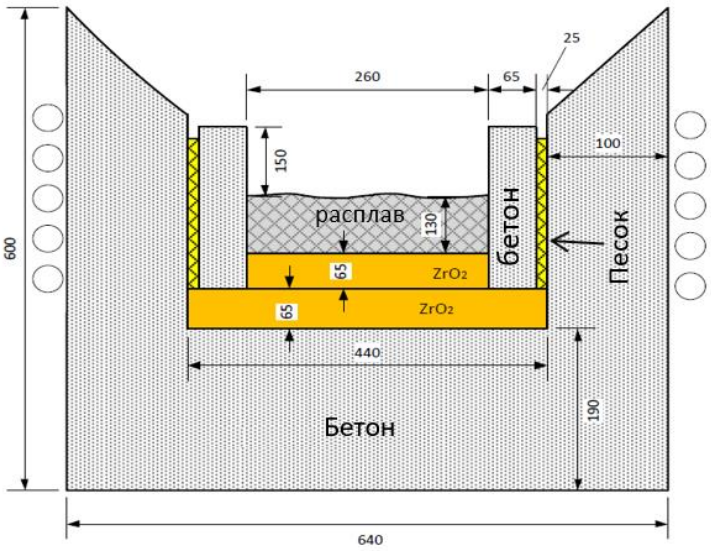
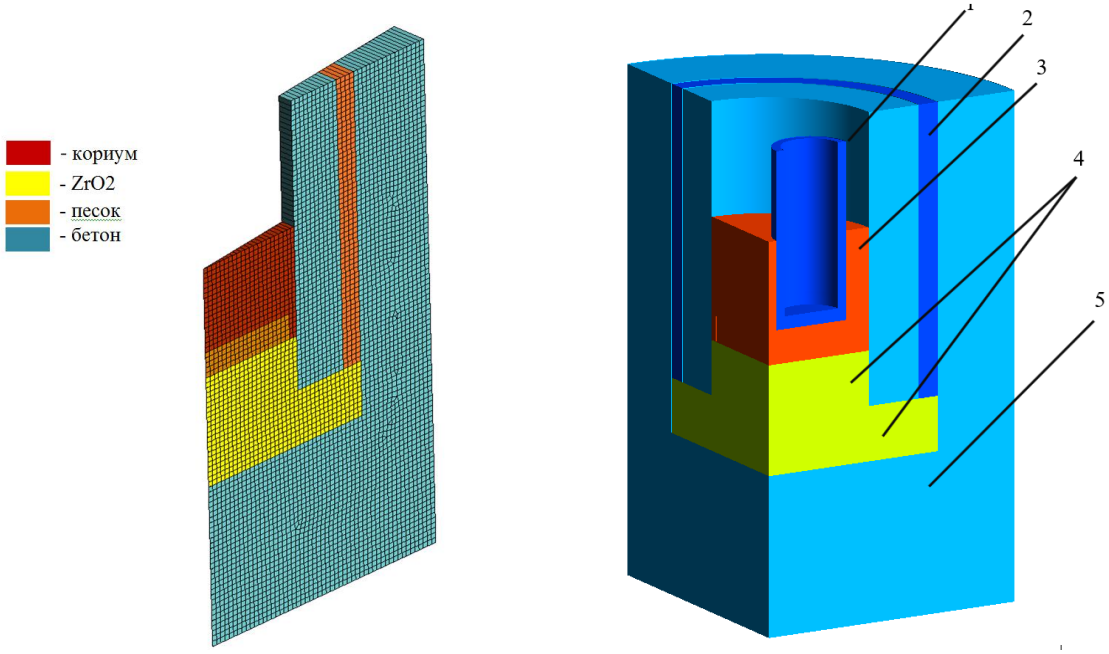


Рисунок 20 – Схема экспериментальной ловушки расплава установки «Лава-Б»

В силу симметрии ловушки относительно центральной оси для моделирования теплообмена в ловушке расплава при индукционном нагреве кориума была выбрана двумерная осесимметричная расчетная область, и четвертая часть трехмерной модели ловушки расплава с плазмотронными нагревателями соответственно. Расчетные области ловушек представлены на рисунке 21.



а) индукционный нагрев б) плазмотронный нагрев

1 – плазмотрон; 2 – песок; 3 – кориум; 4 - огнеупорный блок; 5 – бетон

Рисунок 21 – Расчетные модели индукционного и плазмотронного нагрева кориума в ловушке расплава

Для проведения сравнения двух методов нагрева расплава в каждом из расчетов эквивалентны:

а) Начальные условия (начальная температура кориума 2500 °С);

б) Масса нагреваемого кориума;

в) Теплофизические свойства материалов;

г) Мощности, выделяемые в расплаве для обоих типов нагрева расплава (мощность, выделяемая в расплаве, составляла 35 кВт);

д) Расчетное время нагрева – 30 минут.

При этом тепловыделение в расплаве задавалось в зависимости от особенностей индукционного и плазмотронного нагрева:

1) Поверхностного эффекта проникновения вглубь материалов проводящей среды при индукционном нагреве или скин-эффекта (в данном расчете 70 % всего тепловыделения выделялось на поверхностном слое). При этом глубина этой поверхности определяется теорией индукционных установок [87].

2) В случае плазмотронного нагрева, используется допущение, что тепло, передаваемое кориуму, задается на внутренней поверхности графитового наконечника плазмотронов в области образования электрической дуги. Данное упрощение позволяет значительно ускорить и упростить проводимые расчеты за счет уменьшения количества элементов в теплофизической модели так как в данном случае достаточно лишь наличие внешнего графитового наконечника плазмотрона в качестве источника теплоты в модели.

Валидация описанных методов моделирования остаточного энерговыделения в прототипе кориума была проведена ранее и, следовательно, они могут быть применимы для проведения нестационарных расчетов изменения температуры в элементах ловушки [88, 89].

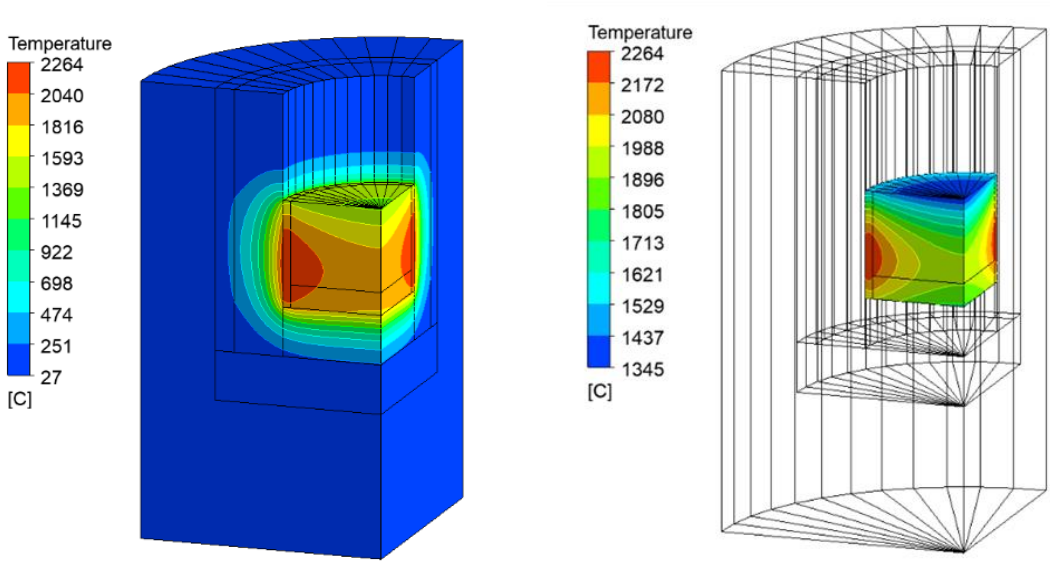
Теплофизические модели учитывают:

- Зависимость свойств элементов ловушки от температуры;
- Теплообмен излучением;
- Конвективный теплообмен между внешними поверхностями модели и окружающей средой.

Некоторые свойства кориума при проведении компьютерного моделирования были использованы их источников [90, 91]. Следует отметить, что ввиду дефицита сведений о зависимости коэффициента теплопроводности кориума от температуры, при проведении расчетов ее величина принималась константой. При этом величина коэффициента теплопроводности задавалась аналогично ранее проведенным расчетам нагрева кориума в рамках проекта МНТЦ № К-1265 по программе INVECOR [92, 93].

Теплофизические свойства элементов ловушки использовались согласно литературному источнику [94].

Результаты расчета нагрева кориума индукционным способом представлены на рисунке 22.

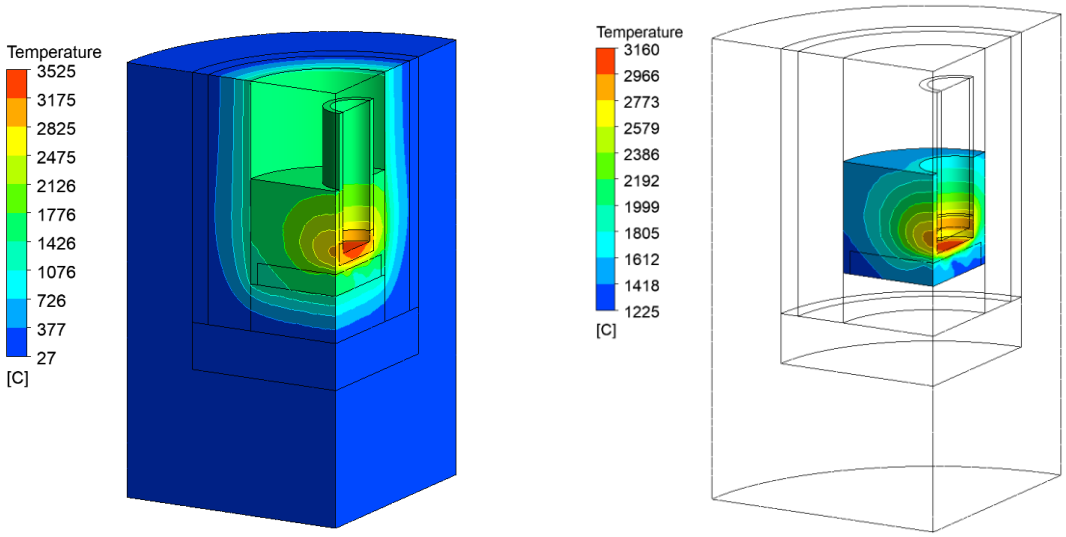


а) б)

Рисунок 22 – Распределение температуры модели при индукционном нагреве

На протяжении всего расчета тепло выделяется на боковой поверхности и передается из области тепловыделения в центральные объемы кориума за счет теплопроводности. Из рисунка 22 видно, что минимальные температуры в кориуме наблюдаются на поверхности расплава. Это можно объяснить излучением с поверхности кориума, а также конвективным теплообменом с окружающей средой.

Результаты расчета нагрева кориума плазматронным способом представлены на рисунке 23.



а) б)

Рисунок 23 – Распределение температуры модели при плазмотронном нагреве

Из рисунка 23 видно, что распространение тепла в кориуме при плазмотронном нагреве происходит от тепловыделяющей области плазмотрона к боковым поверхностям. Минимальные температуры наблюдаются в граничной области кориум-стенка. Очевидно, что это связано с удаленностью области тепловыделения и активным теплообменным процессом между материалами ловушки и кориумом, что приводит к значительному снижению температуры кориума.

В таблице 1 приведены расчетные значения температур кориума, полученные в ходе проведения компьютерного моделирования.

Таблица 1. Расчетная температура кориума

Параметр	**Индукционный нагрев**	**Плазмотронный нагрев**
Средняя температура кориума, °С	2009	2193
Максимальная температура кориума, °С	2264	3160
Минимальная температура кориума, °С	1345	1225

Как видно из таблицы 1, при использовании плазмотронного нагрева достигаемая максимальная температура кориума значительно выше относительно индукционного способа. Преимущество плазмотронного нагрева просматривается и в случае сравнения среднеобъемных температур кориума. Согласно таблице 1, можно утверждать о преимуществе плазмотронного метода имитации остаточного энерговыделения перед индукционным.

Плазмотронные нагреватели основываются на методе косвенного электродугового нагрева [95]. В конструкции нагревателей, используемых на установке «Лава-Б», образовывается электрическая дуга, температура которой может достигать несколько тысяч градусов, тепло от которой передается через специальный защитный графитовый наконечник расплаву кориума. Таким образом, учитывая высокие значения температуры, которые возникают в плазмотронном нагревателе, в области их соприкосновения с кориумом будут наблюдаться высокие температуры сопоставимые с температурой внутри нагревателей.

Наличие небольшой области кориума, нагретой до более высоких температур относительно остального объема, приводит к повышению значения средней температуры всего кориума. В связи с этим, данные таблицы 3 не позволяют провести объективное сравнение двух методов нагрева.

При сравнении температурных полей двух теплофизических моделей (рисунок 22б и рисунок 23б), видно, что при индукционном нагреве нагрев кориума более равномерней за счет объемного тепловыделения энергии. Это и подтверждается, если посмотреть на график распределения температуры в произвольном сечении (от центра к периферии) в кориуме, представленный на рисунке 24. Распределение температуры при индукционном нагреве более равномерное, что нельзя сказать о плазмотронном нагреве, где наблюдается большой перепад температуры.

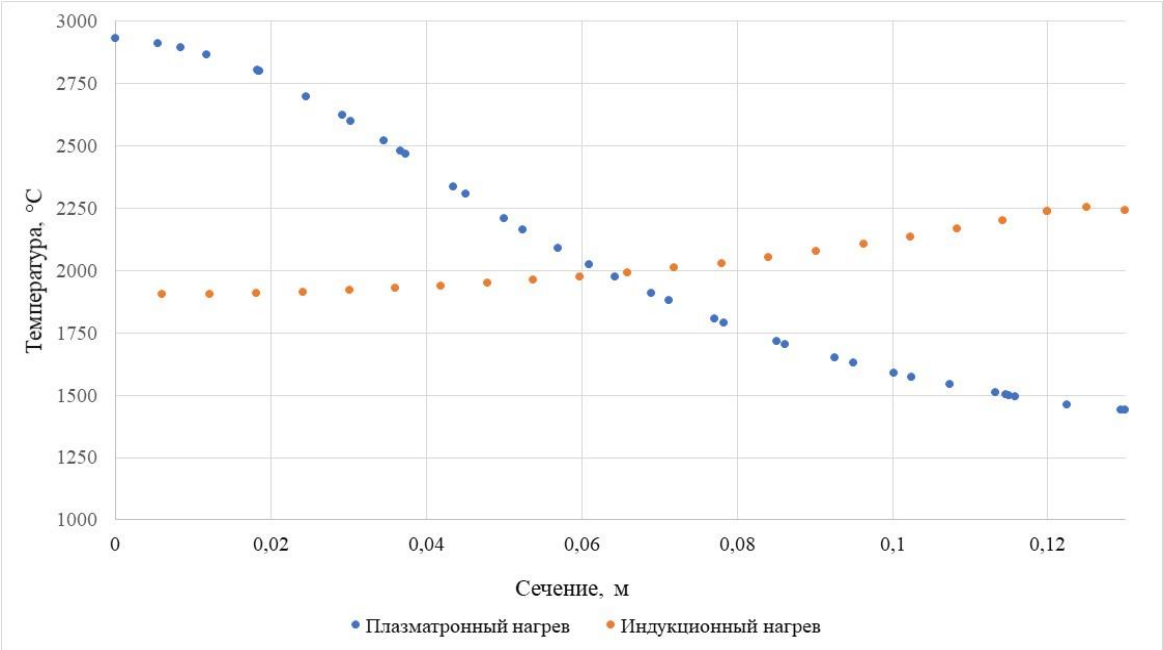


Рисунок 24 – Распределение температуры в расплаве

Исходя из численных расчетов можно сделать вывод, что при использовании плазматронных нагревателей можно достичь более высоких температур кориума по сравнению с индукционным нагревателем. Эта особенность плазматронных нагревателей может быть использована при проведении экспериментов с кориумом, в случаях невозможности использования индукционного нагревателя.

Однако в контексте будущих экспериментов на установке «Лава-Б» индукционный нагреватель выглядит более предпочтительным методом имитации остаточного энерговыделения. В случае индукционного нагрева тепло выделяется на боковой поверхности кориума в пределах скин-слоя. Объемное выделение энергии индукционным нагревателем позволяет получить более равномерное тепловое поле, а выделение энергии в области постоянных теплообменных процессов кориума с материалами ловушки позволяет поддерживать кориум в расплавленном состоянии, тем самым приближая экспериментальную ситуацию к реальным процессам [96, 97].

В тоже время, небольшая тепловыделяющая поверхность плазматронных нагревателей приводит к образованию большого градиента температур в кориуме. При определенных условиях предполагается затвердевание кориума в областях, наиболее удаленных от нагревателей, особенно в областях интенсивного теплообмена кориума с материалами ловушки. В связи с этим, для проведения физического моделирования необходимо получить максимальный КПД индукционного нагревателя УПР.

3.3 Экспериментальное моделирование остаточного энерговыделения кориума индукционным методом на установке «Лава-Б»

Для проведения экспериментального моделирования взаимодействия кориума с кандидатным жертвенным материалом из оксида алюминия и свинцового слоя в качестве метода имитации остаточного энерговыделения был выбран индукционный нагрев. Индукционный нагрев является сложным технологическим процессом, эффективность которого зависит от множества параметров [98].

Для проверки применимости системы индукционного нагрева были выполнены калибровочные эксперименты на установке «Лава-Б». Основной задачей являлось определение наиболее оптимальных характеристик индукционной системы для эффективного нагрева кориума в бетонной ловушке при проведении калибровочных экспериментов [99, 100].

Методика проведения калибровочных экспериментов заключается в следующем:

1) Нагреваемый графитовый цилиндрический блок, моделирующий расплав материалов активной зоны, размещается в специальной экспериментальной секции установки «Лава-Б». Экспериментальная секция представляет собой бетонную ловушку, установленную в цилиндрический индуктор. На рисунке 25 показан графитовый блок, установленный в бетонную ловушку при проведении калибровки индукционной системы.



Рисунок 25 – Внешний вид индуктора с размещенной внутри бетонной ловушкой с графитовым блоком и термопарами

2) Проводится серия экспериментов по нагреву графитового блока в бетонной ловушке с помощью индукционного нагревателя. Отличием

экспериментов друг от друга является использование разной ёмкости, конденсаторной батареи колебательного контура, и различной электрической мощностью, подаваемой на индуктор с помощью ППЧВ 500-2,4-10000. Таким образом проверяется работоспособность системы и определяется максимально возможный коэффициент полезного действия.

В состав батареи на установке «Лава-Б» входят девять основных конденсаторов и один подстроечный.

Проведение постэкспериментального анализа полученных результатов и определение наиболее оптимальных параметров индукционной установки проводится путем сравнения динамики и эффективности нагрева графитового блоков в различных экспериментах. Параметры установки при проведении калибровочных экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Условия проведения экспериментов

№	**Параметр**	**Значение**
1	Мощность на выходе ППЧВ, кВт	150 - 230
2	Рабочее напряжение индуктора УПР, В	до 1000
3	Расход воды в тракте охлаждения индуктора, кг/с	0,5
4	Давление в подающем коллекторе оборотной воды, МПа	1,25
5	Давление в подающем коллекторе ЭТС, МПа	0,18
6	Конечная температура графитового блока, °С	1000

3) В качестве основных средств измерения температуры в графитовым блоке используются хромель-алюмелевые термопары кабельного типа. Схема размещения таких термопар в графитовом блоке приведена на рисунке 26.

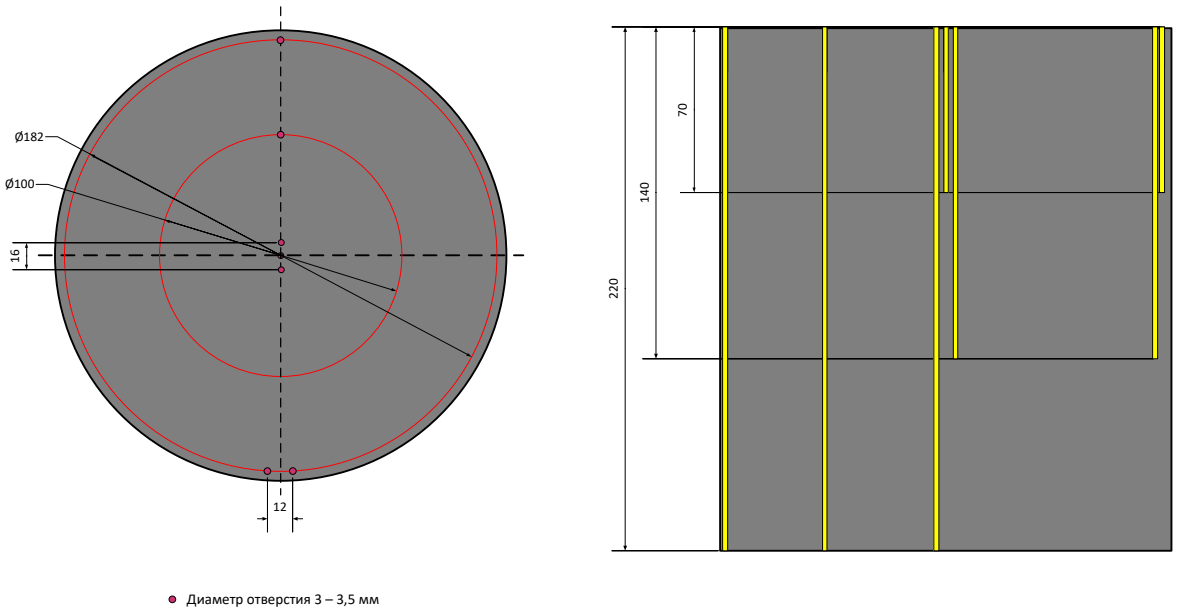


Рисунок 26 – Схема размещения термопар в графитовом блоке

4) Для расчета эффективности индукционного нагрева был выбран косвенный метод определения КПД, или так называемый калориметрический метод [101].

В результате калибровочных испытаний индукционной системы было проведено пять экспериментов по нагреву графитового блока в бетонной ловушке. В качестве примера анализа эффективности индукционного нагрева приведены результаты и расчет КПД системы первого эксперимента.

На рисунках 27 и 28 приведены графики изменения электрических параметров системы индукционного нагрева и температуры в различных точках графитового блока, регистрируемых термопарами. Увеличение мощности индуктора происходило ступенчатым образом путем увеличения напряжения, подаваемое на индуктор, поскольку в случае резкого повышения напряжения нагрузки индуктора, вероятность выхода индукционного нагревателя из строя высока. Суммарная емкость конденсаторов составляла 295,95 мкФ. Интегральное количество подведённой энергии, которое определяется графическим методом, за время эксперимента составила $Q_{in} = 51{,}1 \cdot 10^6$ Дж.

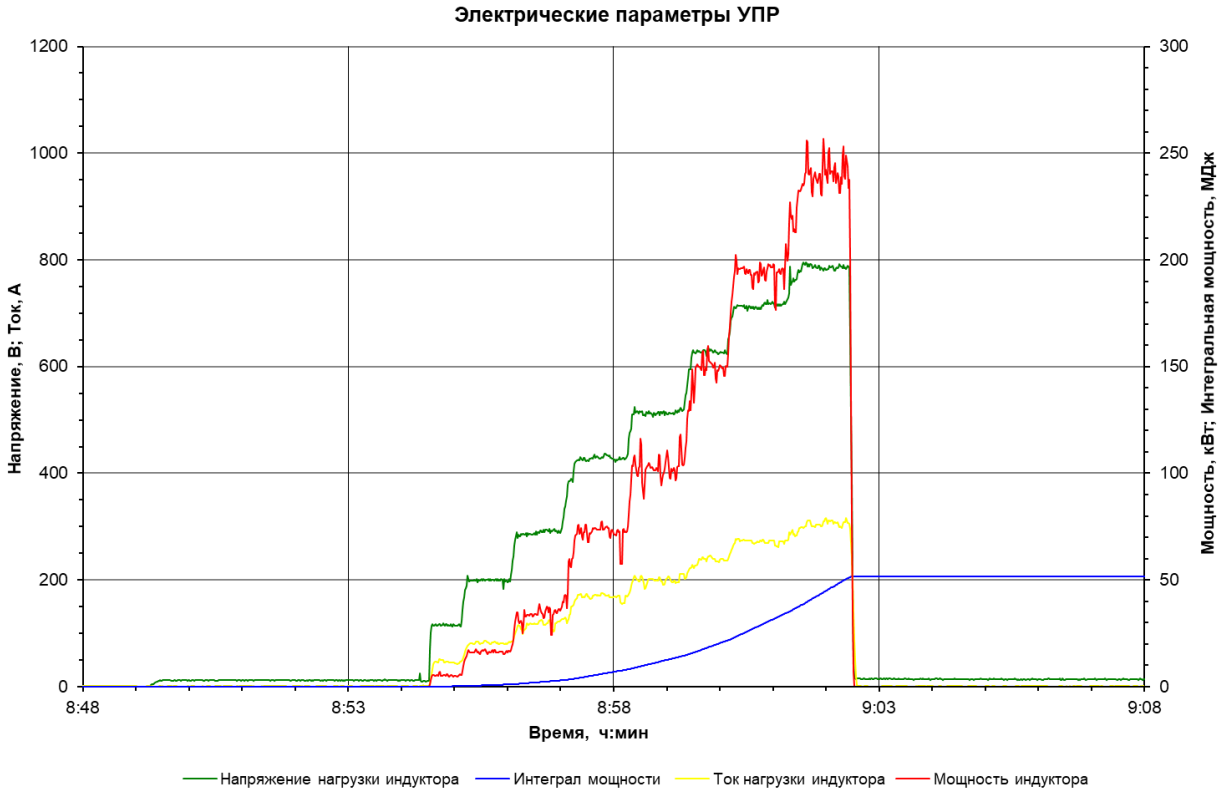


Рисунок 27 – Изменение электрических параметров индуктора во время первого эксперимента

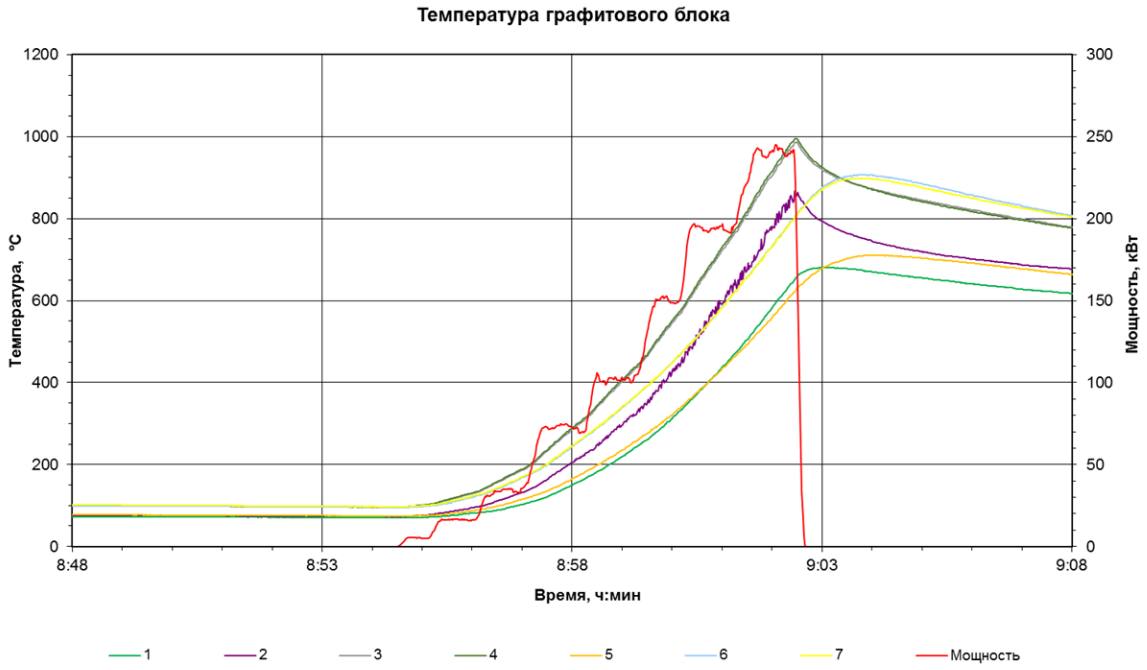


Рисунок 28 – Изменение температуры графитового блока во время первого эксперимента

Для расчета КПД индукционного нагрева был выбран калориметрический метод. В процессе расчета КПД использовали значения теплоемкости графита, рассчитанной по следующей формуле [94]:

$$Cp = -474 + 4{,}9532 \cdot T - 3{,}6093 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 9{,}3068 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 \qquad (1.5)$$

Находим количество тепловой энергии, требуемое для нагрева графитового блока до средней температуры:

$$Qeq = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} Cp(T)dT = 10{,}87 \cdot 10^6 \text{ Дж}, \qquad (1.6)$$

где: T_1 – средняя начальная температура блока на выбранном участке, T_1=90 °С;

T_2 – средняя температура блока после нагрева, T_2=850 °С;

m – масса графитового блока (13,72 кг).

Начальная и конечные значения температуры определяются путем нахождения средней температуры графитового блока в момент времени начала и остановки подачи напряжения на индуктор.

Ввиду относительно небольшого времени нагрева графита мощность тепловых утечек при проведении эксперимента не учитывается при проведении расчета КПД индукционного нагрева.

КПД индукционного нагрева, определяемый калориметрическим методом, составляет:

$$E = \frac{Q_{eq}}{Q_{in}} = \frac{10{,}87 \cdot 10^6}{51{,}1 \cdot 10^6} \approx 0{,}21 \qquad (1.7)$$

Таким образом, КПД индукционного нагрева для первого эксперимента составил 21 %. Аналогично рассчитываются КПД для всех проведенных экспериментов.

Основные результаты измерений и расчётов всех пяти калибровочных экспериментов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные результаты калибровочного эксперимента

Наименование параметра	Значение параметра				
Эксперимент	1	2	3	4	5
Рабочее напряжение индуктора, В	788	940	903	950	920
Рабочий ток индуктора, А	288	171	189	175	164
Мощность ППЧВ, кВт	227,7	161	171	167,7	151
Ёмкость конденсаторной батареи, мкФ	295,95	275,52	283,32	279,42	277,78
Масса графитового блока, кг	13,72				
Интегральное количество подведённой энергии к индуктору, МДж	51,1	38,3	21,6	16,9	17,7
КПД системы индукционного нагрева, определенная калориметрическим методом, %	21	41	33	46	36
Время нагрева, с	540	615	315	280	340
Удельное энерговыделение в графитовом блоке, кВт/кг	1,45	1,86	1,65	2,02	1,37

Таким образом, результаты выполненных калибровочных экспериментов позволили определить наиболее оптимальные параметры индукционной системы и доказали работоспособность индукционного нагревателя для его использования в качестве метода имитации остаточного энерговыделения в кориуме на установке «Лава-Б».

Анализ результатов показал, что при суммарной ёмкости конденсаторной батареи 279,42 мкФ и напряжении, подаваемого на индуктор, равным 950 В, эффективность данной индукционной системы будет максимальной.

Величина удельного энерговыделения в графитовом блоке составляет 2,02 кВт/кг. В процессе нагрева прототипа кориума величина энерговыделения будет несколько ниже. Нагрев графитового блока индукционным методом проходит более интенсивно по сравнению с прототипом кориума, ввиду более

высоких теплофизических и электрических свойств графита, однако, полученное значение энерговыделения в графитовом блоке значительно выше необходимой. Из этого можно сделать вывод, что индукционный нагрев прототипа кориума способен выделять в расплаве необходимое количества тепла и может быть использован для имитации остаточного энерговыделения.

3.4 Формирование бассейна кориума индукционным методом в ловушке расплава установки «Лава-Б»

Особенностью установки «Лава-Б», является разделение этапов формирования расплава материалов активной зоны реактора и его взаимодействие с конструкционными материалами. Плавление материалов происходит в индукционной печи с горячим тиглем, после чего он перемещается в устройство приема расплава (УПР) [70], в которой находится объект испытания. Однако, в результате проведенных консервативных расчетных оценок получено, что мощности индуктора в УПР может быть достаточно для непосредственного получения расплава и последующего поддержания кориума в жидкой фазе. В связи с этим, для оптимизации проведения экспериментов в контролируемых условиях возникла идея – экспериментально проверить возможность получения кориума методом индукционного нагрева непосредственно в ловушке расплава УПР. Кроме того, такой способ позволит избежать проблему контакта кориума с углеродной средой плавильной печи установки «Лава-Б».

Таким образом, необходимо провести экспериментальное подтверждение возможности получения кориума методом индукционного нагрева непосредственно в ловушке расплава УПР.

Для оценки теплового состояния экспериментального устройства и определения условий проведения эксперимента было выполнено компьютерное моделирование индукционного нагрева загруженной шихты на стационарном уровне мощности индуктора. Целью проведенного моделирования было подтверждение реализуемости испытания с рассматриваемой конструкцией устройства и объемом материалов шихты. В качестве достигаемой температуры кориума было принято значение равным 2500 К, исходя из ранее проведенных экспериментов на установке «Лава-Б» с аналогичным составом шихты [102, 103].

Расчетные исследования проведены с применением программного комплекса ANSYS, основанным на методе конечных элементов [104]. Исходные данные индукционного нагрева для проведения моделирования выбраны на основе усредненных параметров ранее выполненных экспериментов [105, 106] и учетом технических возможностей установки «Лава-Б»:

- Активная мощность индуктора составляет 120 кВт;
- Электрический КПД индуктора составляет 45 %;
- Коэффициент мощности индуктора с учетом компенсации составляет 0,9.

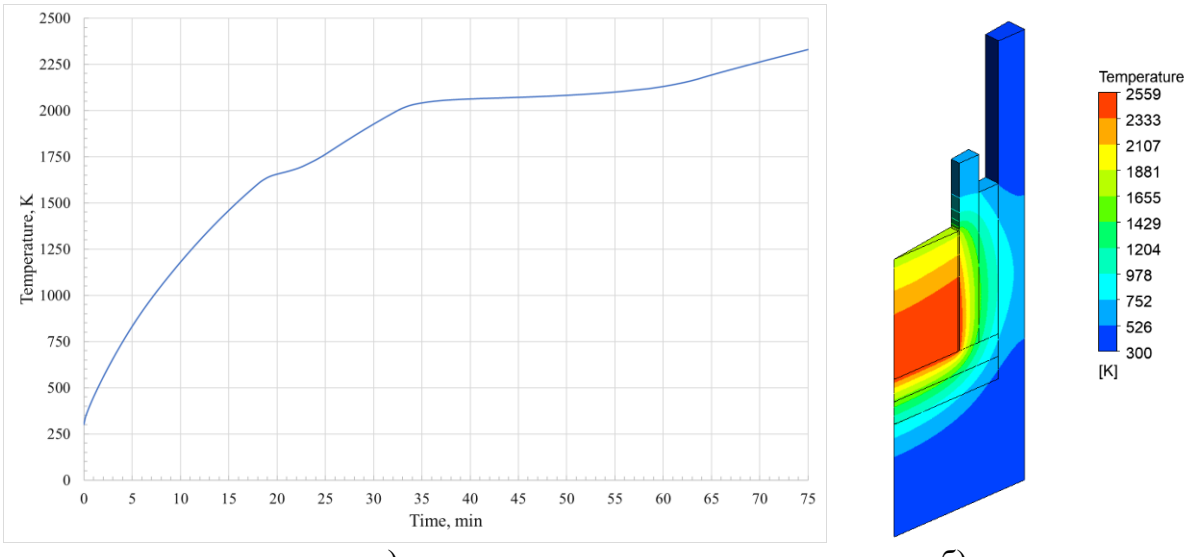
Валидация метода моделирования нагрева кориума была проведена ранее и, следовательно, она может быть применена для проведения нестационарных расчетов изменения температуры в элементах ловушки [84].

В процессе выполнения моделирования были выбраны контрольные точки - к.т.1, к.т.2, к.т.3, расположение которых идентичны расположению термопар 1-04, 1-07, 1-08 в ловушке расплава исходя из условия симметрии.

На основе представленных результатов компьютерного моделирования были определены условия проведения физического моделирования получения кориума в ловушке расплава УПР.

Для создания условий контролируемой среды во время проведения эксперимента в качестве основных параметров контроля выбрана измеряемая температура и мощность индукционного нагревателя. Нагрев компонентов расплава осуществляется путем поднятия напряжения на индукторе УПР до 900 В (темп 100 В/мин, N ≈ 120 кВт), при этом интегральное количество подведённой к шихте в бетонной ловушке энергии, среднее значении максимальной мощности, выдаваемой ППЧВ и значения температуры расплава за время эксперимента должны коррелировать с результатами компьютерного моделирования. Для контроля температуры в бетонной ловушке в качестве средств измерения применяются вольфрам – рениевые термопары градуировки 5/20.

При проведении компьютерного моделирования индукционного нагрева шихты на установленном уровне мощности индуктора температура в контрольных точках достигает 2500 К через ~ 75 минут после начала нагрева. При этом средняя температура полученного кориума составляет ~ 2350 К. На рисунке 29 представлены результаты компьютерного моделирования.



а) б)

а) изменение значений средней температуры кориума; б) температурное поле модели

Рисунок 29 – Результаты компьютерного моделирования

На рисунке 29а представлен график изменения средней температуры кориума с течением времени при установленной мощности индуктора.

Учитывая теплофизические свойства компонентов кориума, приблизительно через 60 минут после начала нагрева в ловушке сформируется бассейн расплава металлической компоненты.

На рис. 36б приведено температурное поле расчетной модели в момент времени равным 75 минут. Средняя температура кориума составляет 2350 К при максимальной температуре равной 2559 К.

Анализ температурного поля показал, что температура внешней поверхности бетонной секции может достигать температур свыше 700 К. Высокий уровень градиента значений температуры между кориумом и внешней стенкой бетонной секции может привести к разрушению экспериментального устройства ввиду возникающих термических напряжений. Как будет показано ниже, данное предположение было подтверждено при визуальном анализе состояния бетонной секции после проведения эксперимента.

Таким образом, расчет показал, что при заданных параметрах индукционного нагревателя УПР установки «Лава-Б» температура кориума в выбранных контрольных точках достигает значения 2500 К через 75 минут после начала нагрева. Общее интегральное количество теплоты, подведенное к кориуму, составляет ~540 МДж.

После проведенного компьютерного моделирования был проведен эксперимент по получению прототипа кориума в ловушке расплава УПР [107]. Основные данные, полученные в результате проведенного эксперимента представлены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры эксперимента

№	Параметр	Значение
1	Длительность испытания, мин	90
2	Средняя мощность ППЧВ, кВт	130
3	Интегральное количество теплоты, подведённой к кориуму, МДж	529,74
4	Максимальная температура, К	2305

Как мы видим, основные параметры физического эксперимента коррелируют с результатами компьютерного моделирования. На рисунке 30 представлен график изменения температуры шихты в ловушке. Как и предполагалось, в результате особенностей индукционного нагрева, в частности скин-эффекта [87], более интенсивный нагрев происходил у боковых стенок огнеупорных блоков, как показывают термопары 1-04 и 1-05.

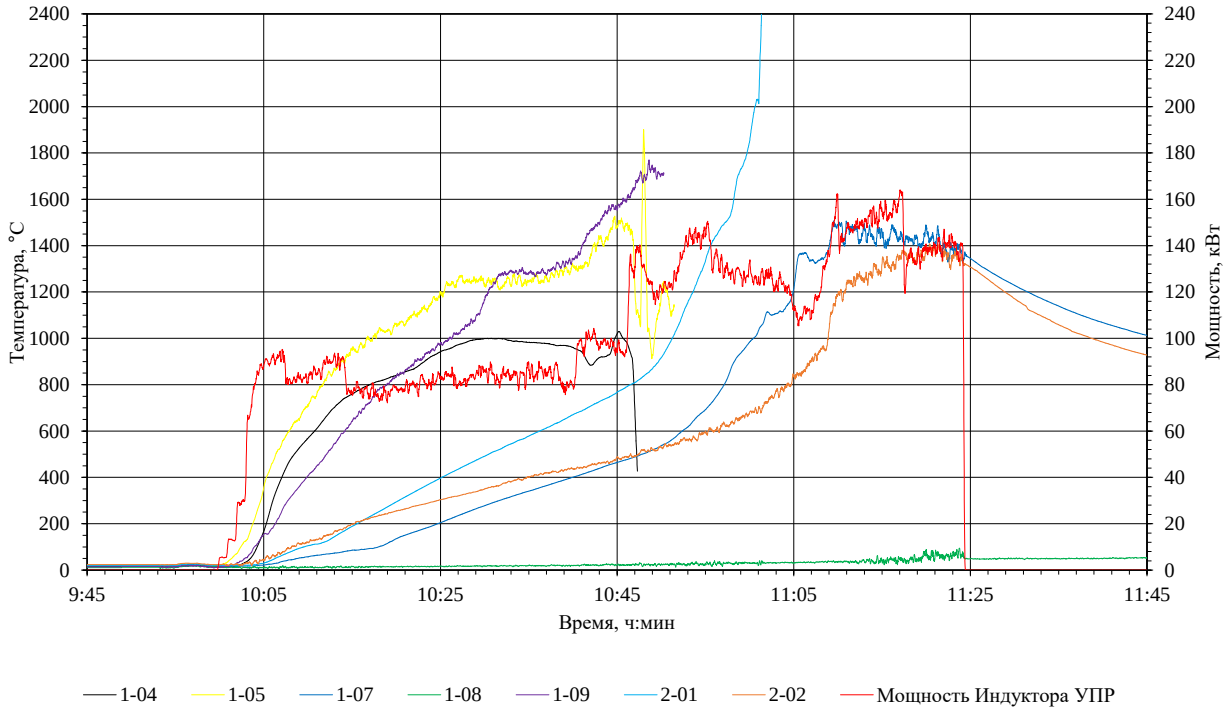


Рисунок 30 – Изменение температуры шихты во время эксперимента

Как видно на представленной диаграмме по истечению 50 минут происходит резкие изменения показаний термопар возле боковых стенок огнеупорных блоков. На основании чего, можно сделать предположение о начале процесса плавления и интенсивного взаимодействия компонентов шихты (вероятно, плавление стали и циркония). То есть, можно сделать вывод о том, что в течении часа после начала эксперимента в ловушке расплава металлические компоненты перейдут в жидкое состояние, сформировав при этом бассейн кориума.

Визуальным подтверждением процесса плавления компонентов кориума выступают зафиксированные после открытия УПР подтеки затвердевшего расплава, вышедшего через одну из горизонтальных трещин в нижней трети бетонной ловушки (рисунок 31).



а б в

а) – расположение затвердевшего расплава на поверхности тележки: б) – материал, собранный с поверхности тележки, в) – затвердевшие капли расплава с днища корпуса УПР.

Рисунок 31 – Затвердевший расплав, вышедший из трещины в стенке бетонной ловушки

В месте с тем, как и предполагалось в процессе компьютерного моделирования, индукционный нагрев кориума привел к образованию перегретых областей и формированию центров термонапряжения бетонной стенки ловушки. Ввиду возникших термических напряжений в стенке бетонной ловушки образовывались трещины, через которые расплав вытекал за пределы ловушки в УПР (рисунок 32).

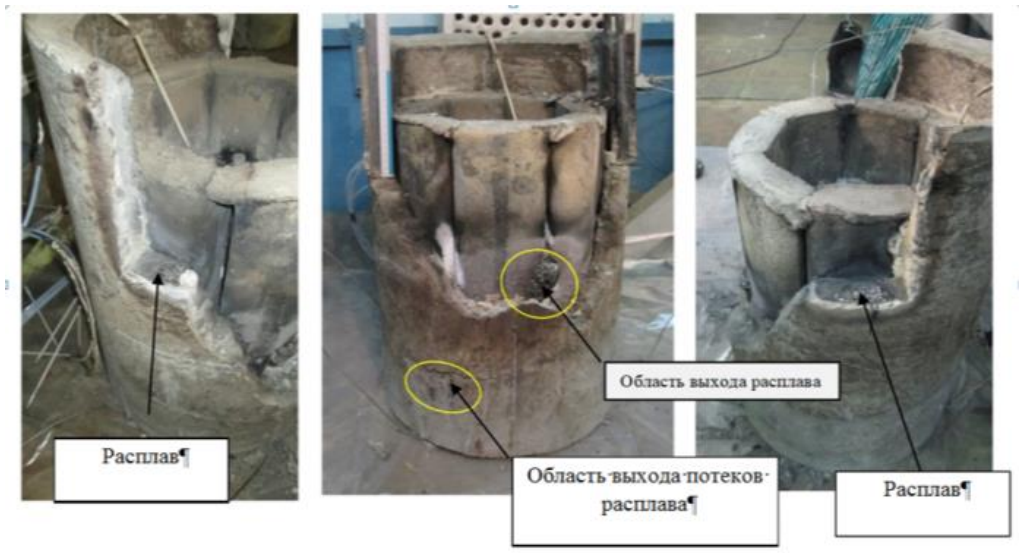


Рисунок 32 – Внешний вид ловушки после удаления части стенки

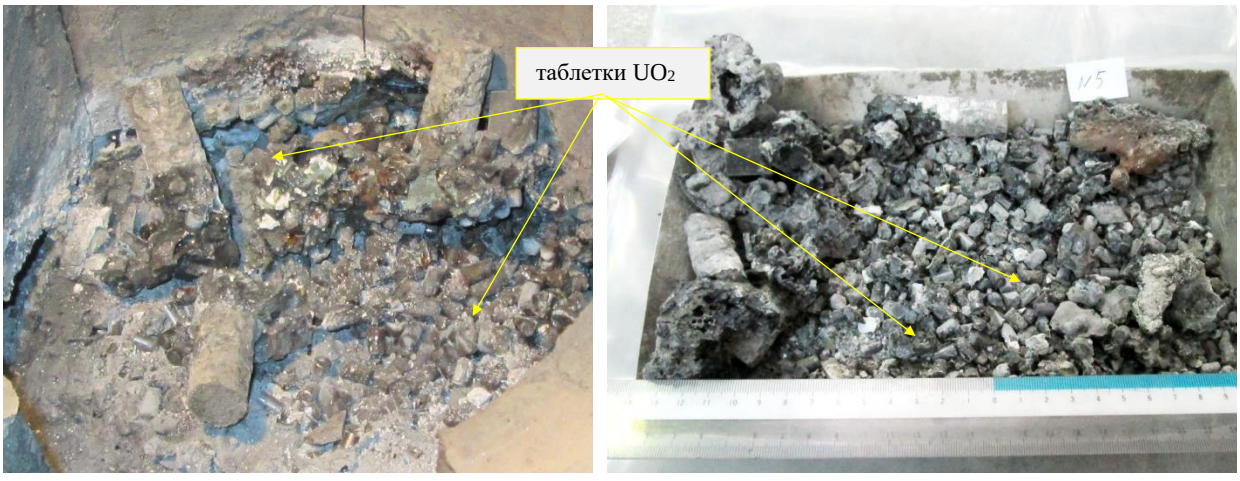
При исследовании полученного в результате нагрева материала шихты, его компоненты извлекались послойно и данный процесс осуществлялся в два этапа. На рисунке 33 показан извлеченный материал.



Рисунок 33 – Извлеченный из ловушки материал

Первым этапом были извлечены фрагменты стальных и циркониевых стержней загрузки (рисунок 33, слева), оплавленные снизу остатки вертикально расположенных стержней загрузки. Далее – частично спекшиеся фрагменты дисперсной составляющей шихты (таблетки диоксида урана, порошок диоксида циркония, циркониевые пластинки) (рисунок 33, справа).

Вторым этапом были извлечены остатки вертикальных стержней загрузки, оплавленные на уровне или несколько ниже максимально выступающего уровня уплотненной шихты. Извлечение повело за собой отделение части претерпевших плавление фрагментов шихты, формировавших «корку» из таблеток диоксида урана, связанных металлическим расплавом (рисунок 34).



а б

а -материал в ловушки после механического извлечения остатков циркониевых стержней;
б –извлеченный на втором этапе материал.

Рисунок 34 – Извлечение второго слоя фрагментов шихты

На основе проведенного исследования полученного кориума, как видно из рисунков 33 и 34, можно сделать вывод, что компоненты шихты в бетонной ловушке расплавлены не полностью, нерасплавленными оказались фрагменты стальных и циркониевых стержней, а также, частично спекшиеся фрагменты дисперсной составляющей кориума.

Результаты физического эксперимента по изучению возможности формирования бассейна кориума индукционным способом нагрева в ловушке расплава установки «Лава-Б» показали, что в процессе индукционного нагрева шихты в ловушке его металлические компоненты перешли в жидкое состояние, сформировав при этом бассейн расплава. Эти процессы подтверждаются как анализом графика изменения температур в эксперименте, так и визуальным способом. Однако не все компоненты, формирующие кориум в бетонной ловушке, были расплавлены полностью. Это можно объяснить потерями тепла на излучение в среду УПР, а также тепловым взаимодействием со стенками ловушки, которые существенно холодней расплава. Высокий градиент температуры между стенками ловушки и кориумом приводит к возникновению термических напряжений, которые разрушают ловушку. Происходит выход расплава через трещины за пределы ловушки в УПР. В связи с этим, можно сделать вывод о том, что в случае использования данной конструкции ловушки предложенный способ получения кориума без принятия дополнительных конструктивных решений не применим. В связи с чем было решено при проведении экспериментального моделирования взаимодействия кориума с жертвенным материалом из оксида алюминия и кипящим свинцовым слоем использовать ЭПП установки «Лава-Б».

Тем не менее, на основе анализа результатов проведенного расчетно-экспериментального исследования можно сделать вывод о потенциальной реализуемости предложенного способа получения кориума. Однако на данном этапе имеются проблемы, связанные с полным плавлением всех компонентов кориума, а также с целостностью экспериментального устройства в период формирования бассейна кориума и во время проведения непосредственно моделирования физико-химических процессов тяжелой аварии.

Подводя итоги проведенных исследований метода получения кориума и его удержания в ловушке расплава УПР установки «Лава-Б», можно сформулировать нижеследующие предложения для его реализации:

- применять меры по снижению потерь тепла излучением с поверхности шихты/кориума в экспериментальным устройстве;
- для увеличения объема жидкой фазы кориума провести дополнительные исследования с варьированием конфигурации загрузки материалов и диаграммы питания индукционного нагревателя. Результаты этих исследований будут способствовать более щадящему формированию жидкой фазы металлических компонент шихты без ее перегрева и последующего растворения «дисперсной компоненты» шихты;

- усилить конструкцию экспериментального устройства с целью повышения его конструкционной стойкости к высоким термическим напряжениям, и как следствие, сохранения целостности в процессе экспериментальных исследований.

3.5 Выводы к главе 3

1. Наличие остаточного энерговыделения должно быть учтено, так как в мощных энергетических реакторах его значения в абсолютных величинах значительны несмотря на то, что интенсивность остаточного энерговыделения быстро спадает до относительно малых величин по сравнению со стационарными значениями;
2. Результаты проведенных расчетов показали, что при равном количестве тепла, которую нагреватели передают в расплав кориума, индукционный нагрев более эффективен с точки зрения его использования как метода имитации остаточного энерговыделения;
3. Результаты выполненных калибровочных экспериментов позволили выбрать наиболее оптимальные параметры индукционный системы и доказали работоспособность индукционного нагревателя для его использования при проведении экспериментального моделирования взаимодействия кориума с кандидатным жертвенным материалом из оксида алюминия и свинцовым слоем в качестве метода имитации остаточного энерговыделения на установке «Лава-Б»;
4. Результаты эксперимента по изучению возможности формирования бассейна кориума индукционным способом нагрева в ловушке расплава установки «Лава-Б» показали, что в процессе индукционного нагрева шихты в ловушке его металлические компоненты перешли в жидкое состояние, сформировав при этом бассейн расплава. Эти процессы подтверждаются как анализом графика изменения температур в эксперименте, так и визуальным способом. На основе анализа результатов проведенного расчетно-экспериментального исследования можно сделать вывод о потенциальной реализуемости предложенного способа получения кориума. Однако, на данном этапе, имеются проблемы, связанные с полным плавлением всех компонентов кориума, а также с целостностью экспериментального устройства в период формирования бассейна кориума, и, во время проведения непосредственно моделирования физико-химических процессов тяжелой аварии.

ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОРИУМА С ЖЕРТВЕННЫМ МАТЕРИАЛОМ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И КИПЯЩИМ СВИНЦОВЫМ СЛОЕМ ЛОВУШКИ РАСПЛАВА

Настоящая глава содержит результаты теплового расчета эффективности использования свинцового слоя для дополнительного теплоотвода от кориума, расчеты температурных полей в ловушке расплава с учетом конструкции приборно-измерительного комплекса установки «Лава-Б» и параметров устройств для имитации остаточного энерговыделения. В данной главе также описаны конструкция экспериментального устройства, результаты экспериментального моделирования взаимодействия кориума с жертвенным материалом.

Результаты исследований, приведенные в данном разделе, опубликованы в работах [115, 116, 117, 119].

4.1 Экспериментальное устройство для проведения исследований взаимодействия кориума с жертвенным материалом

Эффективная локализация расплава требует быстрого и надежного отвода тепла, выделяющегося в объеме кориума. Вода является наилучшим теплоносителем для этого, но для предотвращения паровых взрывов и избытка водорода необходимо внедрение дополнительных технических решений.

В связи с этим, актуальным становятся способы теплоотвода от расплава, исключающие прямую подачу воды на поверхность. В связи с чем, совместно с жертвенным материалом из оксида алюминия на дне подреакторной ловушки расплава будет установлено определенное количество свинца. При попадании кориума в подреакторную ловушку расплава, будет происходить нагрев и дальнейший фазовый переход свинца, на что соответственно необходимо значительное количество энергии. Преимуществом расплавленного свинца является отсутствие реакций образования водорода, а также низкая вероятность парового взрыва по сравнению с водой.

Требования, предъявляемые к материалу, должны удовлетворять не только физическим и химическим свойствам, но и экономической целесообразности использования жертвенного материала:

– эффективный теплоотвод от кориума (сопоставимый с водой);

– разбавление кориума, и соответственно, уменьшение плотности энерговыделения от продуктов деления и обеспечение состояния ядерной подкритичности системы;

– защита стенки ловушки от механических и/или тепловых ударов в момент поступления кориума;

– снижение плотности кориума, для предотвращения эффекта фокусировки тепловых потоков на водоохлаждаемой поверхности корпуса подреакторной ловушки расплава [108];

– использование материала не должно существенно приводить к удорожанию проекта строительства будущих ловушек.

В связи с вышеизложенным, представляется целесообразным провести серию экспериментальных исследований взаимодействия кориума с жертвенным материалом из оксида алюминия с кипящим свинцовым слоем, и дальнейшей выработке рекомендаций по возможному использованию данной композиции для защитной облицовки подреакторной ловушки расплава. Результаты экспериментальных исследований позволят провести обоснованный анализ эффективности предложенного материала, для проектируемой подреакторной ловушки расплава, предназначенной для повышения безопасности АЭС в случае тяжелой аварии. Использование кипящего свинцового слоя позволяет ограничить температуру керамики температурой кипения слоя, обращенного к кориуму, а также обеспечивает эффективный теплоотвод от кориума за счет энергии, затрачиваемой на фазовый переход свинцового кипящего слоя в парообразное состояние [109-117].

Для анализа эффективности теплоотвода остаточного энерговыделения кориума был проведен тепловой расчет в программе ANSYS [85] жертвенного материала с кипящим слоем и без кипящего слоя.

На рисунке 35 приведены модели ловушки расплава с жертвенным материалом с кипящим слоем и без кипящего слоя. В одной из моделей присутствует металлический слой. Для проведения сравнения исходной модели ловушки расплава с ловушкой со свинцовом слоем в каждом из расчетов эквивалентны:

а) Начальные условия (начальная температура кориума 2500 °C);

б) Масса нагреваемого кориума;

в) Теплофизические свойства материалов;

г) Мощности, выделяемые в расплаве в результате наличия остаточного энерговыделения;

д) Расчетное время нагрева.

В расчетных моделях учитывается теплообмен излучением между поверхностью кориума, материалом ловушки, а также конвективный теплообмен между внешними поверхностями модели и окружающей средой.

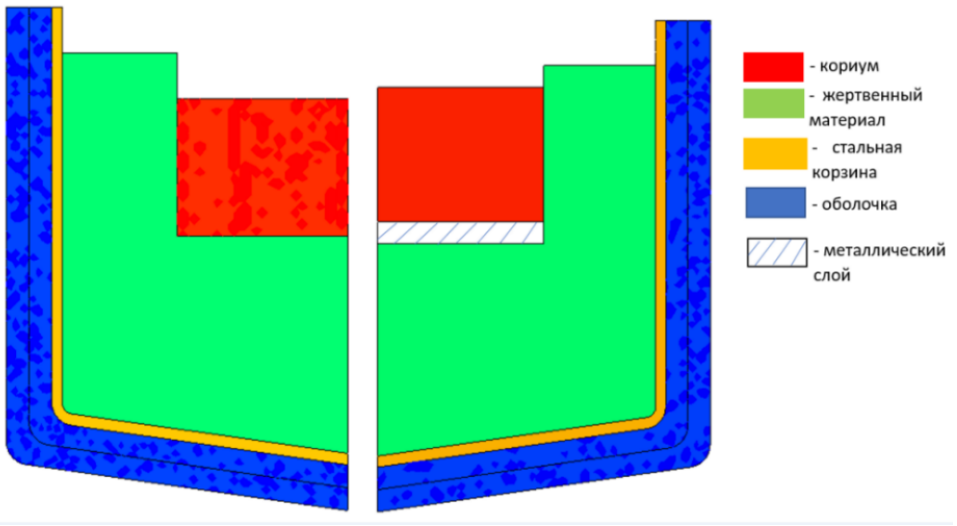


Рисунок 35 – Модель ловушки без кипящего слоя и с ним.

В результате проведения компьютерного моделирования разработанной теплофизической модели взаимодействия кориума с элементами ловушки было получено его температурное поле. На рисунке 36 приведено расчетное температурное поле после взаимодействия кориума с жертвенным материалам ловушки расплава по истечению 150 минут. Видно, что температурное поле ловушки расплава с кипящим слоем ниже и распределено более равномерно по сравнению с температурным полем ловушки без кипящего слоя.

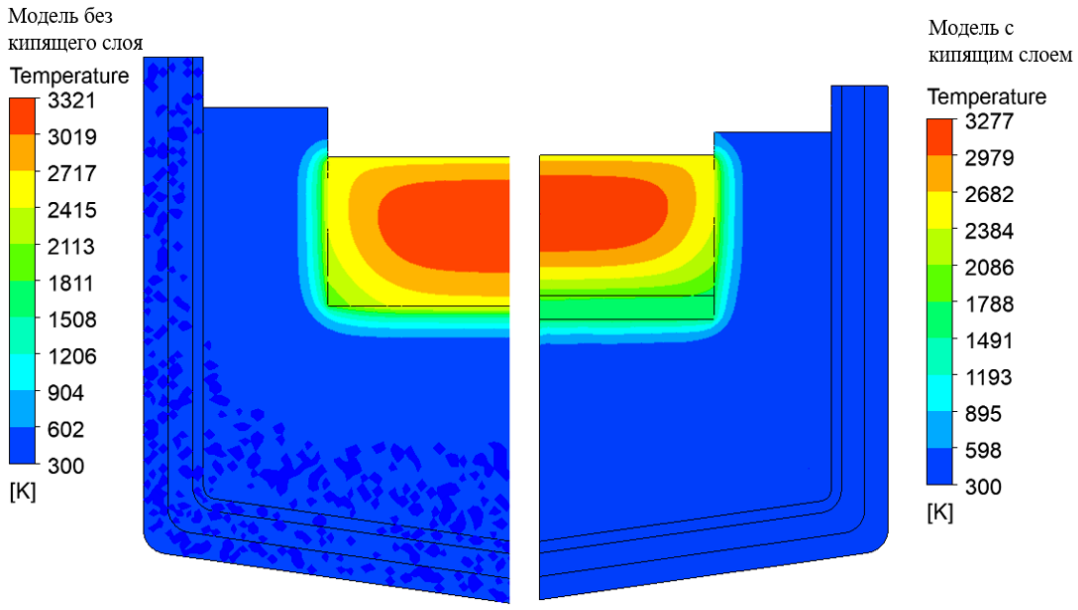


Рисунок 36 – Расчетное температурное поле ловушки расплава по истечению 150 минут после взаимодействия с кориумом.

Изменения средней температуры расплава в ловушках с жертвенным материалом без кипящего слоя (модель 1) и с кипящим слоем (модель 2) показаны на рисунке 37.

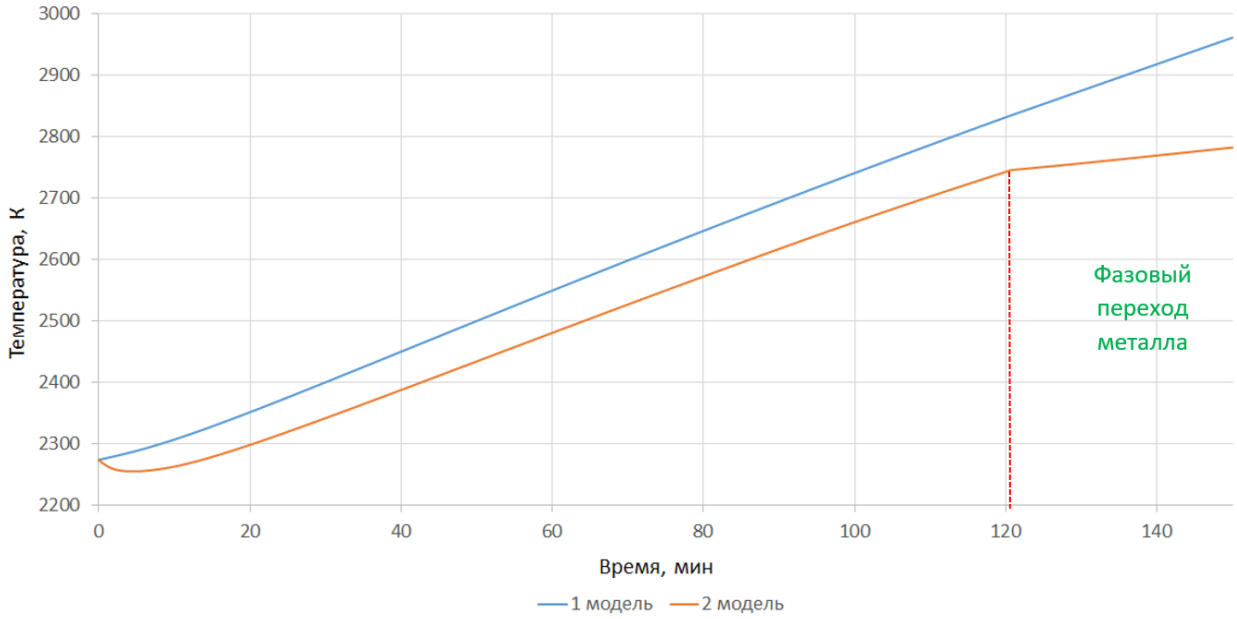


Рисунок 37 – Изменение средней температуры расплава в разных моделях

Увеличение средней температуры расплава вызвано остаточным энерговыделением кориума. Как видно из рисунка 37, увеличение средней температуры расплава проходит менее интенсивно в модели ловушки с кипящим слоем, за счет теплоотвода от кориума к свинцу на совершение фазового перехода.

Количество энергии, которое кориум теряет в процессе теплопередачи свинцовому слою на совершение фазовых переходов можно посчитать по формуле для расчета удельной теплоемкости:

$$C(T) = \frac{1}{m}\left(\frac{\delta Q}{\delta T}\right), \qquad (1.8)$$

где c – удельная теплоёмкость кориума,
Q – количество теплоты, выделившееся при охлаждении кориума,
m – масса кориума,
ΔT – разность конечной и начальной температур кориума.
Следовательно, для определения Q:

$$Q = Cm(T_1 - T_2), \qquad (1.9)$$

Согласно [118] удельная теплоемкость кориума равна c = 565 Дж/кг×К.

В принятой концепции с жертвенными материалами 70% составляет керамический материал и 30% более теплопроводный материал для растворения в кориуме. Согласно [119], масса выходящего кориума из корпуса реактора составляет примерно 200 тонн, в то же время общая масса жертвенных материалов в ловушке составляет 140 тонн. Следовательно, масса керамики около 100 тонн и масса растворяемого материала около 40 тонн.

Масса кориума в нашей модели составила 40 тонн, исходя из выше сказанного масса свинца составила 8 тонн.

Значения средней температуры кориума согласно проведенного расчета при длительности взаимодействия кориума с жертвенным материалом 150 минут составили:

T_1 – 2960 K;

T_2 – 2780 K.

Подставляя полученные значения в (1.9), получим:

$$Q = 4{,}07 \times 10^9 \text{ Дж}$$

Соответственно, удельное количество теплоты, отведимое свинцовым слоем от кориума, составляет:

$$q = \frac{Q}{t} = 0{,}45 \text{ МВт}$$

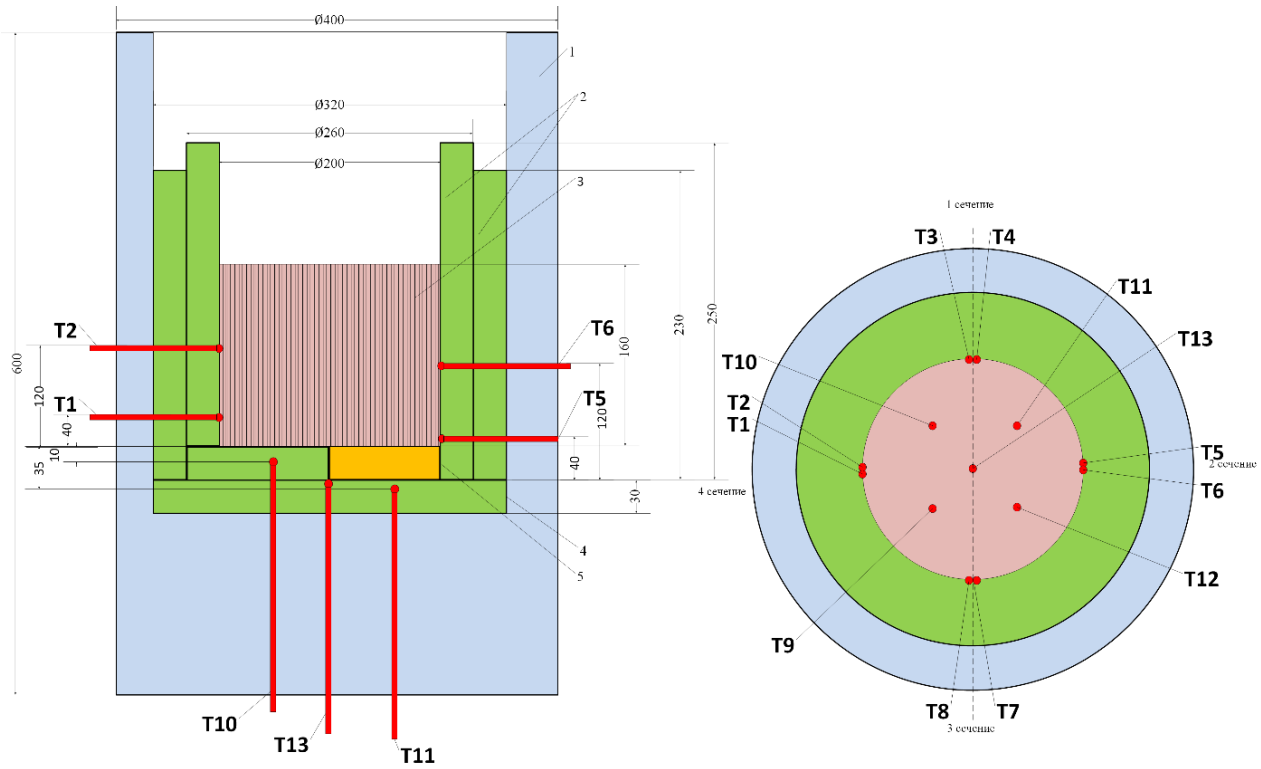
Следовательно, использование свинцового слоя обеспечивает теплоотвод 0,45 МВт от кориума за счет тепловой энергии, затрачиваемые на фазовые переходы свинца.

Таким образом, одним из наиболее простых альтернативных вариантов теплоотвода от расплава является использование кипящего слоя свинца на дне ловушки ядерного реактора в период времени, когда подача воды на расплав нежелательна вследствие генерации водорода и возможного парового взрыва.

Для проведения экспериментального моделирования взаимодействия кориума с кандидатным жертвенным материалом было разработано и изготовлено экспериментальное устройство. Экспериментальное устройство представляет собой бетонную ловушку тигельного типа, с установленным в ней, жертвенным материалом из оксида алюминия со свинцовым слоем. Конструкция ЭУ состоит из следующих основных частей:

- бетонное основание;
- цилиндр из спеченного оксида алюминия;
- диск из спеченного оксида алюминия;
- слой свинца;
- вкладыш из нержавеющей стали.

Схема экспериментального устройства для испытания при взаимодействии кориума, свинца и жертвенного материала представлена на рисунке 38.



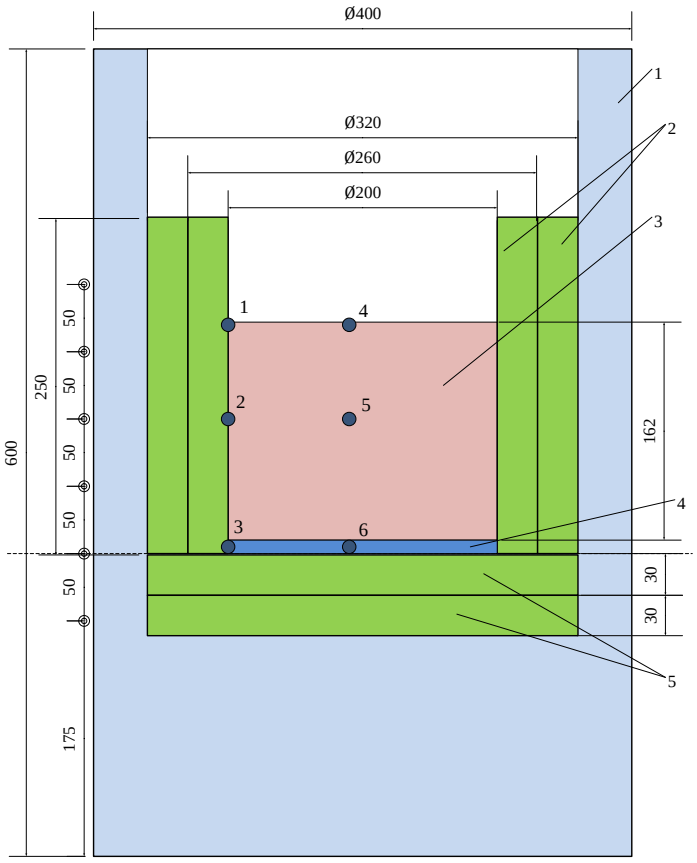
1-бетонная ловушка, 2-боковые блоки из оксида аллюминия (Al_2O_3), 3-расплав, 4-донные блоки из оксида алюминия (Al_2O_3), 5-свинец, T1-T13 – термопары

Рисунок 38 – Схема экспериментального устройства с расположением контрольных точек

Для точного экспериментального моделирования процессов взаимодействия кориума с кандидатным жертвенным материалом ловушки расплава были выполнены расчеты температурных полей в ловушке, учитывающие конструкцию приборно-измерительного комплекса установки «Лава-Б».

Моделирование проводилось для двух случаев: при нагреве расплава и его взаимодействии с жертвенным материалом без свинцового слоя и в случае наличия свинцового слоя в ловушке. Для контроля температуры были выбраны контрольные точки, расположение которых приведено на рисунке 39.

При проведении численных исследований было использовано предположение относительно свойств кориума. Как известно, кориум представляет собой сложную многокомпонентную структуру из различных элементов активной зоны и других материалов реактора [120]. В связи с этим теплофизические свойства расплава кориума различны в зависимости от его состава. Поэтому теплофизические свойства кориума были представлены в виде усредненных значений теплофизических свойств веществ, используемых в качестве прототипа кориума. Данное упрощение хоть и является достаточно грубоватым, однако в контексте проведения подобных расчетов является допустимым.



1 – бетонное основание; 2 – цилиндр из керамического материала; 3 – шихта;
4 – слой свинца; 5 – диск из керамического материала

Рисунок 39 – Схема экспериментального устройства с расположением контрольных точек

Для нагрева шихты предполагается следующая диаграмма мощности:

1 этап – мощность индуктора 40 кВт – до достижения значения температуры внешних контрольных точек ~ 600 °С;

2 этап – мощность индуктора снижена до 8 кВт – временной интервал 20 минут;

3 этап – мощность индуктора 50 кВт – нагрев продолжается до достижения значения температуры в центре шихты ~ 2500 °С.

Далее останов эксперимента.

Теплофизические модели учитывают:

- Зависимость свойств элементов ловушки от температуры;
- Теплообмен излучением;
- Конвективный теплообмен между внешними поверхностями модели и окружающей средой.

Физические свойства кориума и элементов ловушки использовались согласно литературным источникам и предыдущих работ в данной области [94, 102, 103].

В результате проведения компьютерного моделирования разработанных теплофизических моделей были получены их температурные поля. На рисунке 40 приведен график изменения температуры в контрольных точках расчетной модели без свинца и моделей с различной толщиной слоя свинца. Также на рисунке приведена диаграмма мощности и интегральная мощность индуктора.

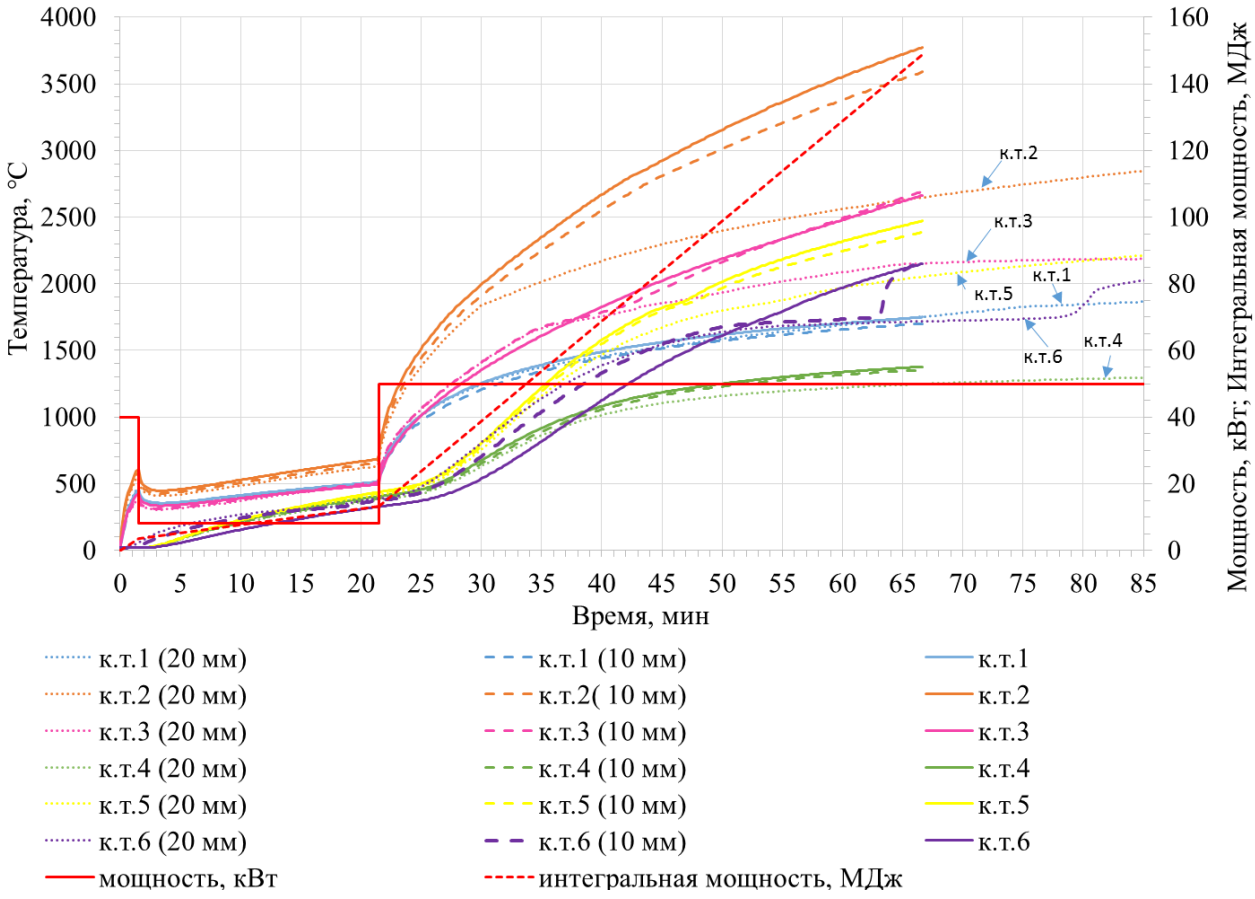
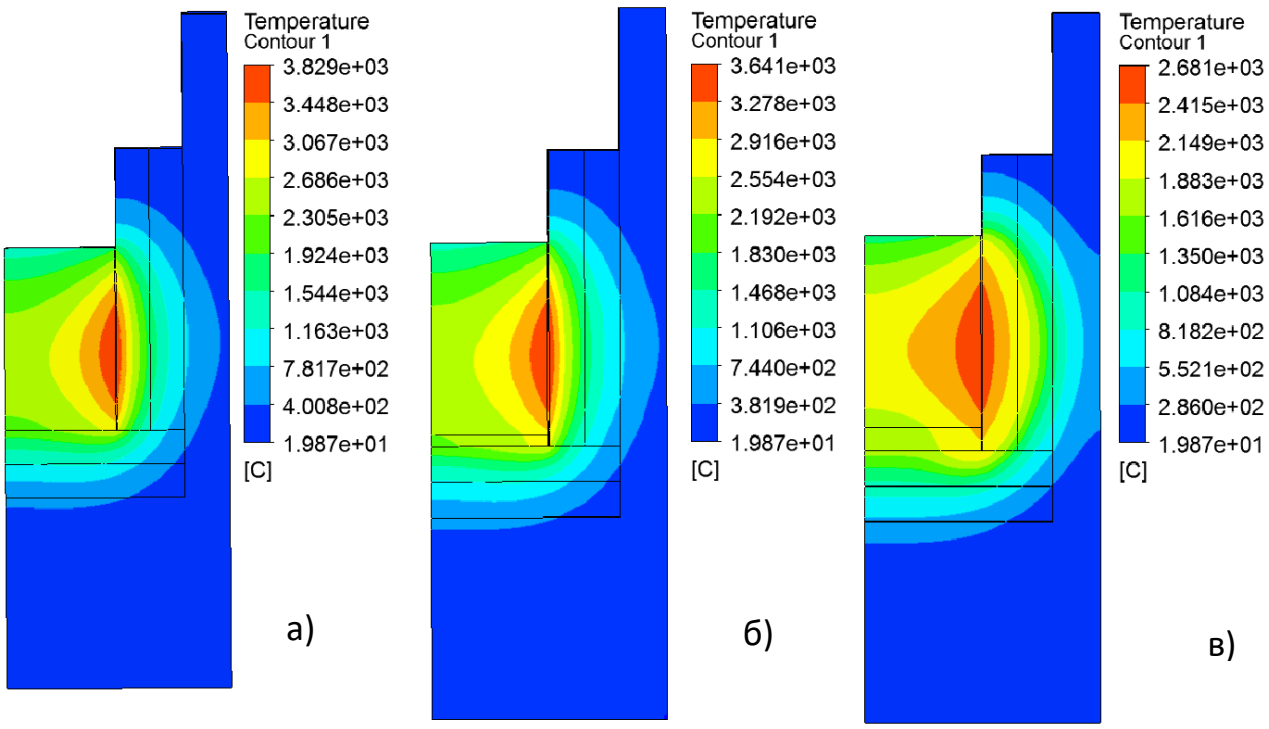


Рисунок 40 – Изменение температуры в контрольных точках для трех вариантов расчетной модели

Как видно из рисунка 40, заметная доля имитируемого остаточного энерговыделения кориума затрачивается на фазовый переход свинцового слоя и зависит соответственно от его толщины.

На рисунке 41 в качестве примера приведены поля распределения температур для расчетных моделей без свинца, со слоем свинца 10 мм и 20мм соответственно через 4000 секунд после начала эксперимента. Температура приведена в градусах Цельсия.



а) модель без свинца; б) модель со слоем свинца 10 мм; в) модель со слоем свинца 20 мм

Рисунок 41 – Расчетные температурные поля моделей

Результаты расчета показывают, что при выбранной диаграмме мощности кипение свинца начнется через ~45 минут после начала эксперимента. После закипания свинца температура его стабилизируется и понадобится некоторое время на испарение, которое будет происходить неравномерно. При наличии 10 мм слоя свинца на испарение понадобится порядка 15 минут, и ~30 минут при наличии 20 мм слоя свинца.

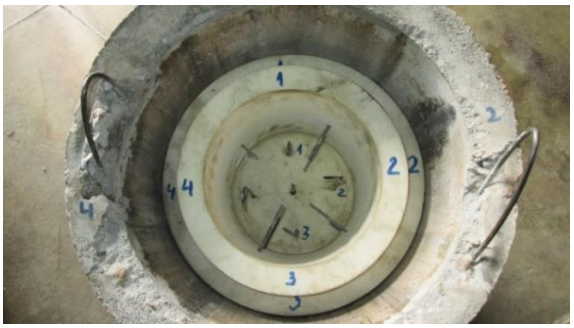
В связи с тем, что получение расплава и последующего поддержания кориума в жидкой фазе непосредственно в экспериментальном устройстве на данном этапе невозможно, было принято решение при экспериментальном моделировании взаимодействия кориума с жертвенным материалом использовать ЭПП установки «Лава-Б» для получения расплава кориума.

Рассмотрим процедуру подготовки экспериментального устройства (модель ловушки расплава) для исследований. Цилиндры, установленные на диски, формировали экспериментальную полость – керамический стакан, внутрь которого устанавливался вкладыш из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Для моделирования кипящего слоя в ЭУ устанавливался полудиск из свинца, который закрывал половину днища стакана и находился под вкладышем из нержавеющей стали. Керамический стакан устанавливался в бетонную ловушку, которая, в свою очередь, размещались в УПР установки «Лава-Б».

На рисунке 42 представлены этапы подготовки ЭУ для проведения исследований, а также этап подготовки ЭПП к эксперименту.



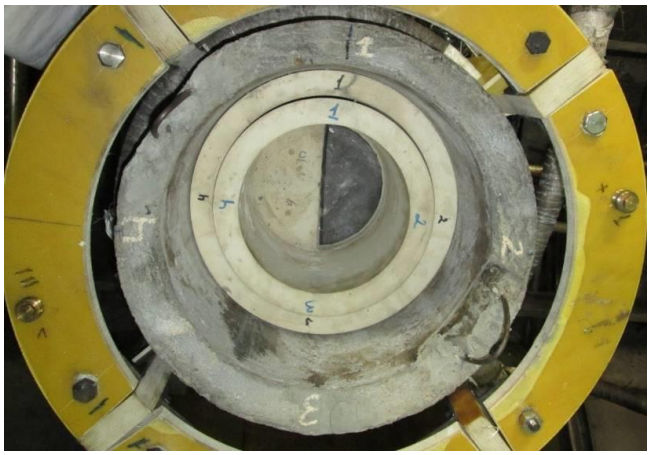
а)



б)



в)



г)



д)



е)

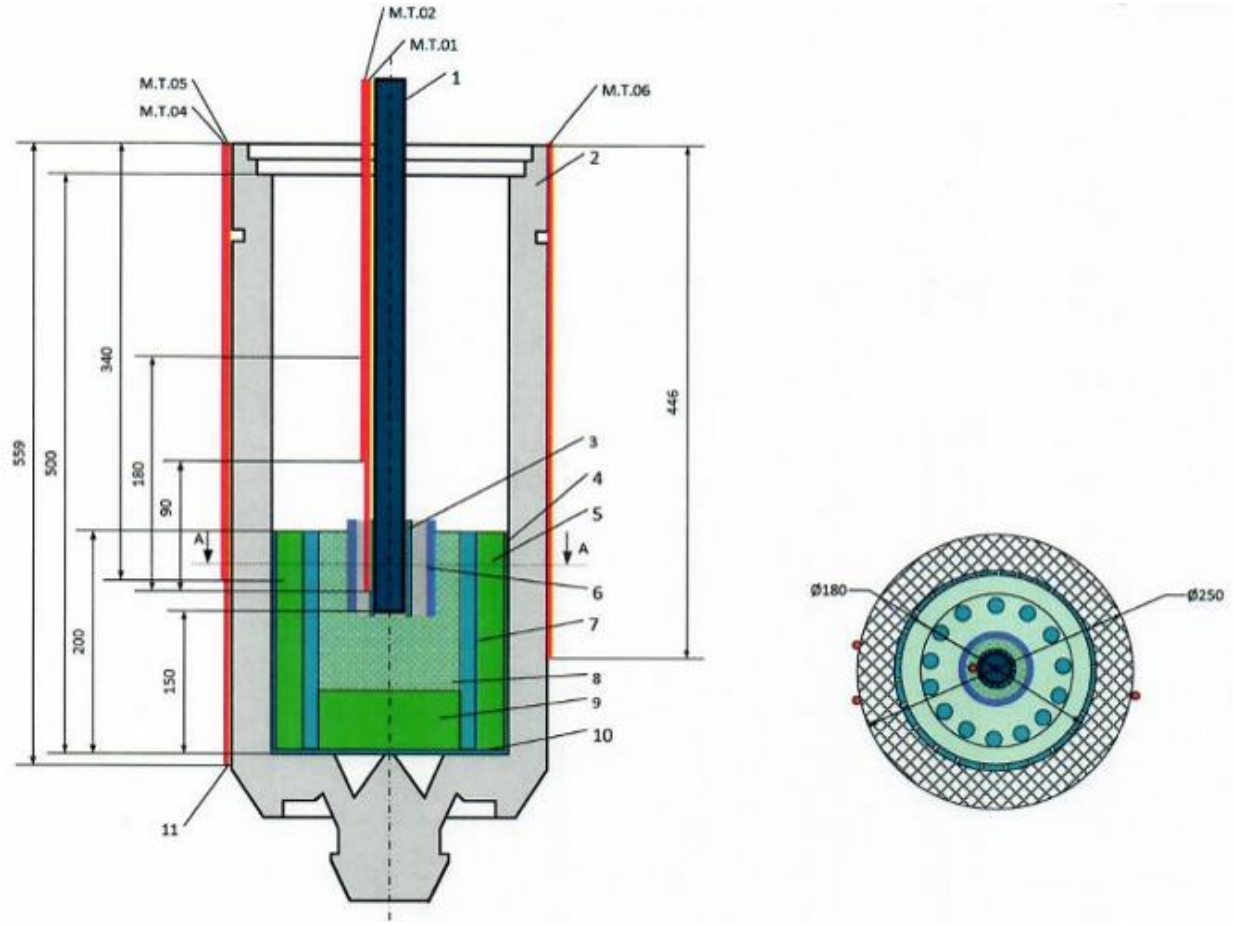
а) цилиндры из оксида алюминия для ЭУ; б) ЭУ с Al_2O_3 с подготовленными закладными для термопар; в) ЭУ с установленными термопарами; г) установка ЭУ в УПР; д) загрузка шихты в графитовый тигель ЭПП для проведения эксперимента; е) ЭПП в сборе перед закрытием верхней крышки

Рисунок 42 – Подготовка ЭУ

4.2 Результаты экспериментального моделирования процессов взаимодействия кориума с жертвенным материалом

Эксперимент по взаимодействию кориума с кандидатным жертвенным материалам [121-124] ловушки расплава и имитацией остаточного энерговыделения проводился в следующей последовательности:

1 этап – плавление шихты в тигле ЭПП до получения расплава с температурой 2500°С. Схема загрузки шихты и размещения термопар в тигле ЭПП представлена на рисунке 43.



1 – термовелл; 2 – тигель; 3 – пластины циркония L = 100 мм; 4 – пластины циркония L = 200 мм; 5 – таблетки UO_2; 6 – картонный цилиндр; 7 – пруток циркониевый; 8 – смесь UO_2+Zr+ ZrO_2; 9 – смесь UO_2+Zr; 10 – диск циркониевый; 11 – термопары.

Рисунок 43 – Схема загрузки шихты и размещения термопар в тигель ЭПП

Плавление шихты осуществляется в следующей последовательности:

1) Поднять напряжение на индукторе ЭПП до U = 600 В (N ≈ 60 кВт) и при достижении по показаниям термопар к.т. М.Т.04, М.Т.05 и М.Т.06 значения 500 – 600 ^{0}С, снизить напряжение на индукторе до U = 200 – 250 В (N ≈ 10 – 12 кВт). В течение времени **τ = 10** минут выдержать полку **Т = 600 ^{0}С**;

2) Поднять напряжение на индукторе ЭПП до 600 В (N ≈ 60 кВт). Контролировать значения температуры по термопарам к.т. М.Т.04, М.Т.05 и

М.Т.06. При достижении температуры ~ **1900 ^{0}C** снизить напряжение на индукторе ЭПП до U = 350 – 400 В (N ≈ 35 – 40 кВт) начать отсчёт времени выдержки полки **T = 1900 ^{0}C (τ ≈ 15 - 17 минут**). Контроль изменения температуры полки вести по показаниям термопар к.т. М.Т.01, М.Т.02.

3) По окончании времени полки T = 1900 ^{0}C подать на индуктор ЭПП напряжение U = 700 – 750 В (N ≈ 100 кВт). Контроль значений напряжения, тока и мощности осуществлять по показаниям, выводимым на монитор ЭВМ. При достижении мощности N ≈ 100 кВт начать отсчёт времени полки. Окончанием процесса плавления шихты считать значение вложенной энергии около ***350 МДж***, при этом температура в тигле должна быть ***~ 2500 °C*** **(τ ≈ 6 - 8 минут)**.

4) По достижению температуры ***~ 2500 °C*** и значения вложенной энергии около ***350 МДж*** проводится скол пробки тигля и расплав сливается в экспериментальное устройство в УПР.

2 этап – взаимодействие кориума с жертвенным материалом с имитацией остаточного энерговыделения кориума. После слива расплава подавали напряжение на индуктор УПР ≈ 1000 В (N ≈ 150 кВт) и обеспечивали работу системы нагрева расплава (имитация остаточного энерговыделения кориума) в течение приблизительно 90 минут.

По полученным данным были построены графики изменения параметров температуры во время эксперимента, приведенные на рисунках 44 и 45.

Основные параметры проведенного эксперимента приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Основные результаты эксперимента

Наименование параметра	**Значение параметра**
Интегральное количество подведённой к бетонной ловушке УПР энергии за время эксперимента, МДж	312,4
Температура расплава перед сливом в ловушку, (инфракрасный пирометр), ºС	2536
Максимальное значение температуры газовой среды в УПР, ºС	219
Температура внешней поверхности корпуса УПР в конце эксперимента, к.т. Л.Т.13, ºС	21
Максимальное значение температуры диска из оксида алюминия на расстоянии 0 мм от кориума, ºС	1914
Максимальное значение температуры диска из оксида алюминия на расстоянии -5 мм от кориума, ºС	1661
Максимальное значение температуры свинца на расстоянии -5 мм от кориума, ºС	1499
Максимальное значение температуры диска из оксида алюминия на расстоянии -10 мм от кориума, ºС	1617
Максимальное значение температуры свинца на расстоянии -10 мм от кориума, ºС	1426
Максимальное значение температуры цилиндра из оксида алюминия на расстоянии 0 мм от дна, ºС	1600

Наименование параметра	Значение параметра
Максимальное значение температуры цилиндра из оксида алюминия (Pb) на расстоянии 0 мм от дна, ºС	1704
Максимальное значение температуры цилиндра из оксида алюминия на расстоянии 40 мм от дна, ºС	1863
Максимальное значение температуры цилиндра из оксида алюминия (Pb) на расстоянии 40 мм от дна, ºС	1544
Максимальное значение температуры цилиндра из оксида алюминия на расстоянии 80 мм от дна, ºС	2095
Максимальное значение температуры цилиндра из оксида алюминия (Pb) на расстоянии 80 мм от дна, ºС	1672
Максимальное значение температуры цилиндра из оксида алюминия на расстоянии 120 мм от дна, ºС	1549
Максимальное значение температуры цилиндра из оксида алюминия (Pb) на расстоянии 120 мм от дна, ºС	1271
Коэффициент мощности индукционного нагревателя cosϕ	~0,89
Рост давления в УПР в ходе эксперимента, атм	от 2 до 3,1
Интегральное количество энергии отведенного охлаждением за время эксперимента, МДж	66,03

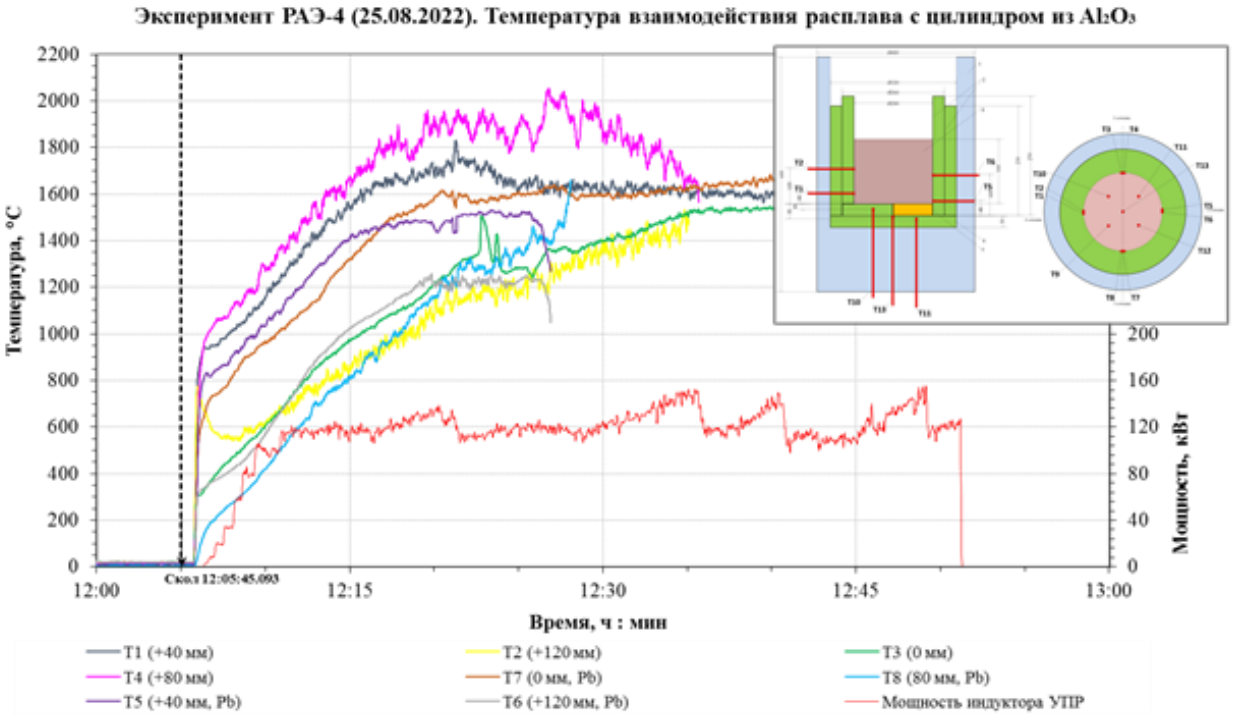


Рисунок 44 – Диаграммы изменения значений температуры цилиндра из оксида алюминия при проведении эксперимента (после слива расплава в бетонную ловушку)

По значениям показаний термопары Т4 было определено максимальное значение температуры расплава в ловушке, которая составила 2095 °С.

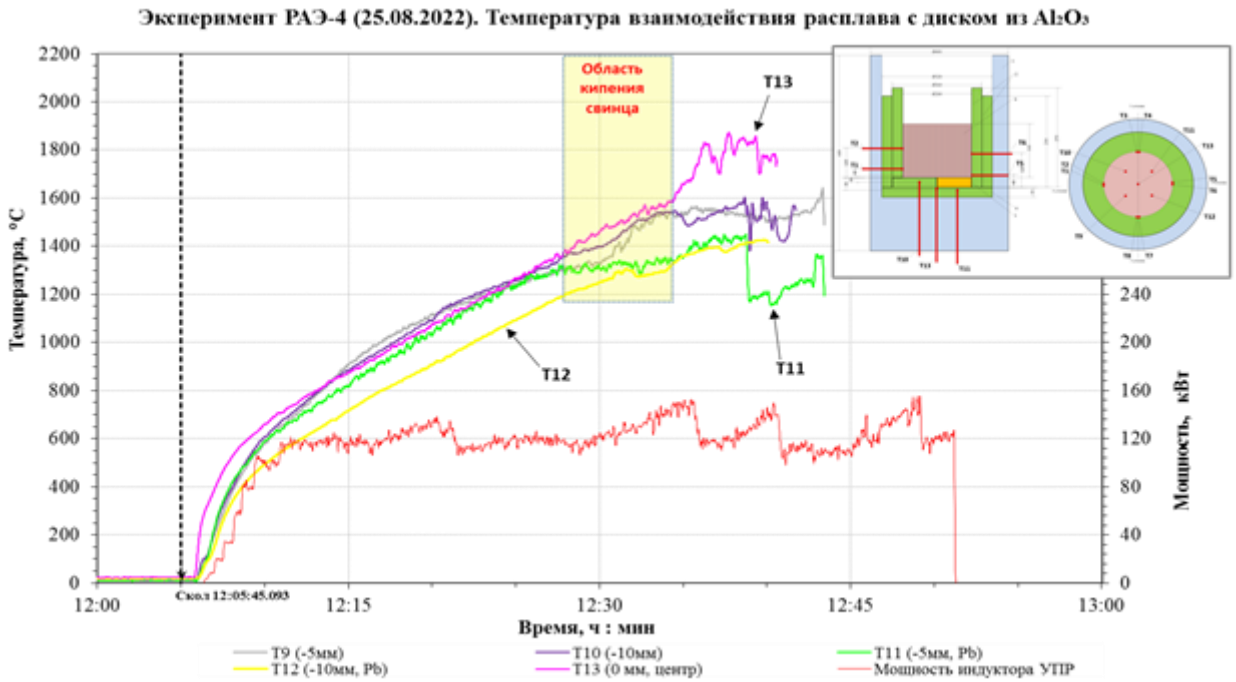


Рисунок 45 – Диаграммы изменения значений температуры диска из оксида алюминия при проведении эксперимента (после слива расплава в бетонную ловушку)

На рисунке 45 показана область кипения свинцового слоя. До начала кипения свинца значения температуры по показаниям термопар Т9 и Т10 (не находятся под слоем свинца) практически не отличаются от показаний термопар Т11 и Т12 (находятся под слоем свинца). После начала кипения свинца рост температуры Т11 и Т12 замедляется. Весьма вероятно, что это может быть связано с дополнительным расходом энергии на плавление свинца. По истечении времени ~6 мин значения температуры в Т11 и Т12 продолжили рост, что может указывать на выкипание основной части свинцового слоя.

Кипение свинцового слоя, также подтверждается, как показал позже проведенный анализ, наличием в камере УПР и на поверхности ловушки расплава частиц материала диаметром от 1 мм до 10 мм (рисунок 46) после эксперимента, визуально определенных как свинец, предположительно осевших в процессе конденсации металлических паров.



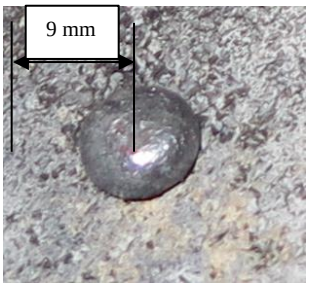


Рисунок 46 – Фрагменты обнаруженного материала в камере УПР и на поверхности ловушки

Для более точного определения состава материала был проведен рентгеноструктурный фазовый анализ. Анализ дифрактограммы показал (рисунок 47), что основной компонентой фазового состава является металлический свинец. Этой фазе соответствуют все основные интенсивные пики дифрактограммы.

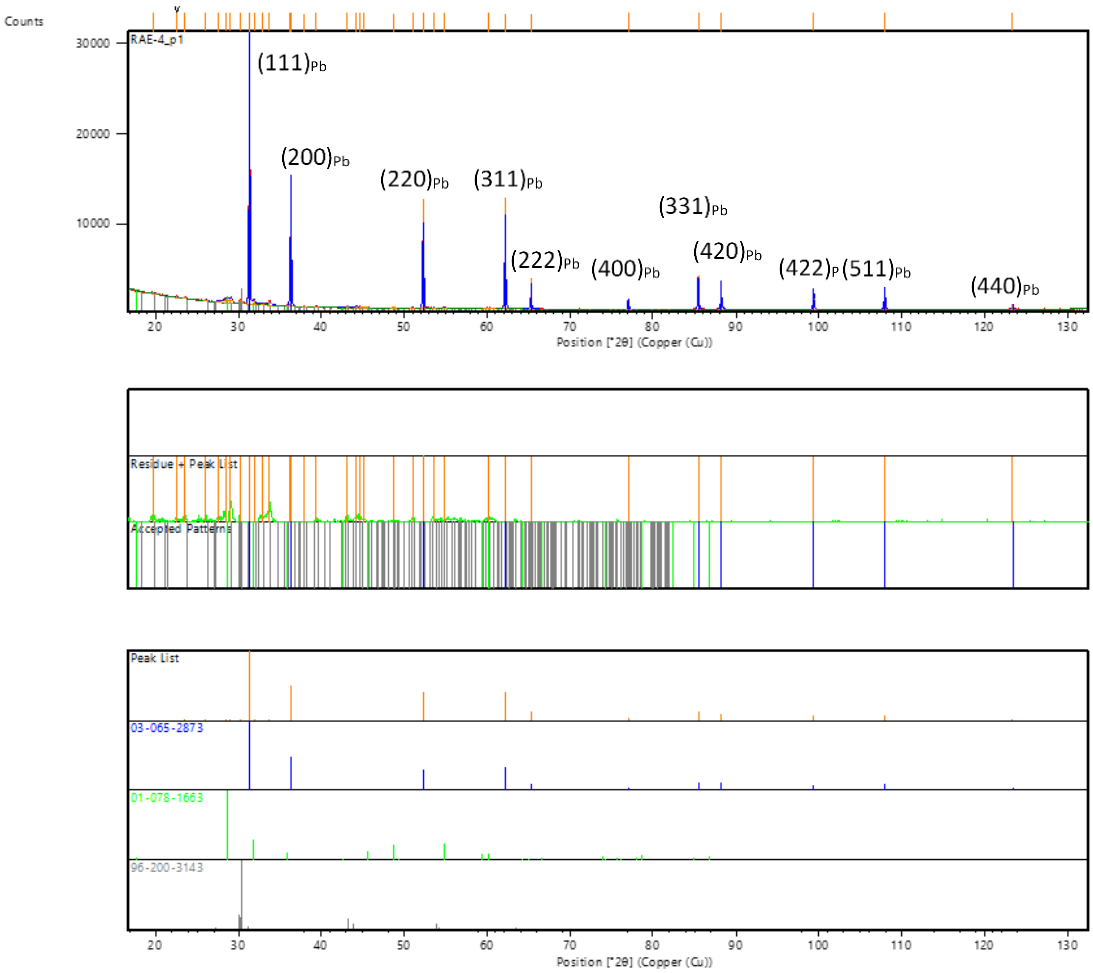


Рисунок 47 – Результат рентгеноструктурного фазового анализа обнаруженного материала в камере УПР и на поверхности ловушки

4.3 Выводы к главе 4

1. Проведенное компьютерное моделирование показало, что за счет фазовых переходов свинцового слоя, средняя температура в ловушке расплава уменьшается, что говорит о перспективности его использование вместе с оксидной частью в качестве ЖМ;
2. Для проведения экспериментального моделирования процессов взаимодействия кориума с моделью ловушки расплава были осуществлены расчеты температурных полей в ловушке. При этом учитывались конструктивные особенности приборно-измерительного комплекса установки «Лава-Б» и параметры устройств, предназначенных для имитации остаточного энерговыделения;
3. Разработано экспериментальное устройство (ЭУ), предназначенное для экспериментального моделирования тепловых и физико-химических процессов взаимодействия кориума с материалами ловушки расплава в условиях имитации остаточного энерговыделения в кориуме. ЭУ представляет собой бетонный стакан, в который устанавливается цилиндр и диск из исследуемого материала, а также вкладыш из нержавеющей стали, которое устанавливается в УПР установки «Лава-Б»;
4. Экспериментальное моделирование взаимодействия кориума с жертвенным материалом показало, что в процессе взаимодействия имело место плавление и последующее кипение свинцовой компоненты. Эти процессы подтверждаются показаниями термопар и наличием свинца в камере УПР и на поверхности ловушки. При этом, при достижении температуры кипения свинца происходит замедление темпа роста температуры керамического материала в некотором интервале времени.

ГЛАВА 5 СТРУКТУРНО – ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ МОДЕЛЬНОГО КОРИУМА ПОСЛЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ЖЕРТВЕННЫМ МАТЕРИАЛОМ

Настоящая глава содержит результаты исследования макро- и микроструктуры образцов материала после взаимодействия кориума с жертвенным материалом на основе оксида алюминия и свинцового слоя. В результате воздействия кориума в процессе эксперимента жертвенный материал претерпел эрозионное разрушение. В результате воздействия часть материала вступила в физико-химическое взаимодействие с компонентами кориума с образованием жидкофазных продуктов взаимодействия.

Результаты исследований, приведенные в данном разделе, опубликованы в работах [121, 125].

5.1 Микроструктура модельного кориума в результате взаимодействия с жертвенным материалом

После проведенного экспериментального моделирования [115] была произведена разборка установки и фотосъёмка состояния бетонной ловушки и элементов установки. На рисунке 48 показаны моменты извлечения бетонной ловушки с расплавом из УПР. Визуально было установлено следующее:

1) наличие многочисленных трещин в стенке бетонной ловушки с двух диаметральных и радиальных сторон, показанные на рисунке 48а и 48б;
2) обнаружены многочисленные трещины цилиндра из оксида алюминия, показанные на рисунке 48г;
3) при извлечении бетонной ловушки из полости УПР, произошло разрушение бетона и малого цилиндра оксида алюминия, показанное на рисунке 48д и 48е.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

а) вид бетонной ловушки расплава сбоку; б) трещины боковой поверхности бетонной ловушки; в) трещины цилиндра из оксида алюминия; г) состояние малого цилиндра оксида алюминия после извлечения ловушки из УПР; д) состояние бетонной ловушки после извлечения из УПР; е) бетонная ловушка после транспортировки из полости УПР.

Рисунок 48 – Ловушка расплава после эксперимента

Далее ЭУ заполнялась компаундом (эпоксидная смола) и подготавливалась к выполнению диаметрального разреза. До начала исследований затвердевшего расплава прототипа кориума, было зафиксировано взаимное расположение фрагментов в ловушке в том виде, в каком они находились на этапе демонтажа. После этого был выполнен вертикальный диаметральный разрез ловушки.

Для надежной фиксации материалов в ловушке были выполнены следующие процедуры:

1. демонтаж остатков бетонных стенок ловушки с зачисткой открывшихся бетонных и других поверхностей от мелкодисперсных материалов;
2. разборка и восстановление со склеиванием фрагментов колец конструкции вставки защитного покрытия и бандажа-обоймы по наружным поверхностям вставки для предотвращения взаимного смещения фрагментов в ходе резки;
3. заливка внутреннего пространства защитной вставки эпоксидной смолой до уровня, чуть выше начального уровня поверхности затвердевшего расплава;

4. монтаж бетонной ловушки внутри металлической бочки с заполнением пустот между ловушкой и внутренними стенками бочки монтажной пеной.

Для получения данных о взаимодействии кориума и керамического материала (оксида алюминия), был выполнен диаметральный разрез ловушки расплава, который показал наличие проникновения кориума за исходную границу боковых стенок керамического материала на различную глубину (проникающей эрозии). Выяснилось, что в сечении ловушки, глубина эрозии боковой стенки оказалась максимальной со стороны, содержащей свинец, при этом со стороны ловушки без свинцового слоя эрозия боковой стенки оказалась минимальной, при этом во всем сечении произошла сквозная эрозия донных дисков и части материала бетонной ловушки. Для последующих микроструктурных исследований необходимо было получить темплеты, содержащие наблюдаемую в сечении картину. Для этого предполагается произвести дополнительный диаметральный разрез половины ловушки и последующую вырезку пластин.

С полученных после дополнительного разреза четвертей ловушки срезались темплеты в виде плоскопараллельных пластин по всей высоте ловушки. Вырезать пластину толщиной около 30 мм из четверти ловушки, содержащей свинец, не удалась в отношении сохранения целостности сечения, так как в процессе резки пластина распалась на множество фрагментов. В связи с этим, из части ловушки, не содержавшей свинец, был вырезан более массивный образец толщиной около 50 мм, находящийся на стыке обеих зон (без слоя свинца и со свинцом). За счет увеличения толщины темплета удалось сохранить его общую целостность. Вырезанная пластина содержит представительную область сечения ловушки с максимальной обнаруженной эрозией боковых стенок и скоплением металла (рисунок 49).



Рисунок 49 – Пластина, вырезанная из ловушки

Как видно, на вырезанной пластине наблюдаются области сквозной эрозии внутренней вставки с локальным проникновением расплава в зазор между внутренней и внешней вставок, частичной локальной эрозией материала внешней керамической вставки.

Выбор области для исследований изменения структуры определялся поиском фрагмента, содержащего все характерные признаки эрозии керамического материала – наличие области эрозии, наличие изменений структуры и трещин керамических вставок.

Для проведения дальнейших материаловедческих исследований заготовка была разрезана на три пластины толщиной около 15 мм. Схема разделки пластины и маркировка образцов показана на рисунке 50.

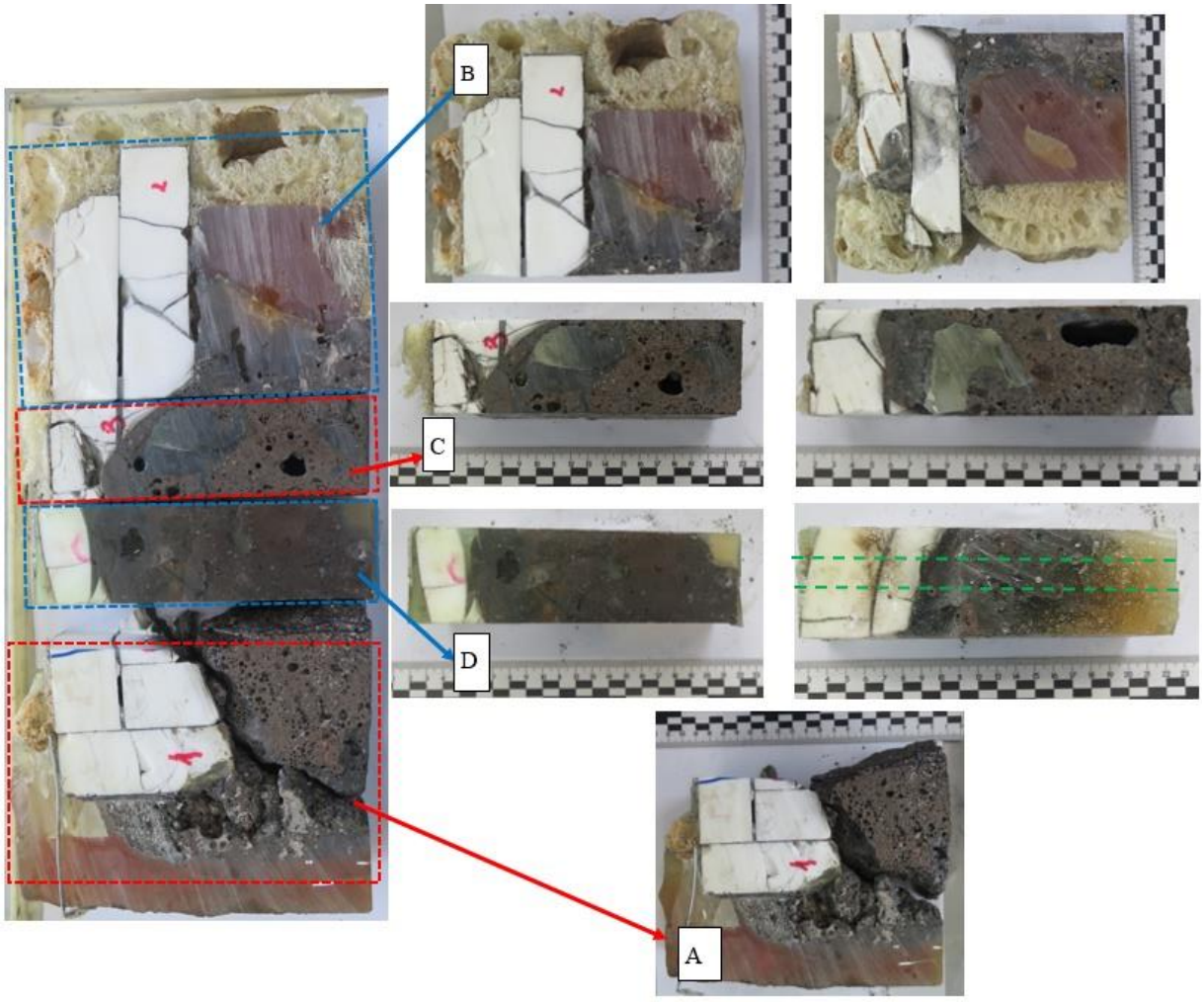
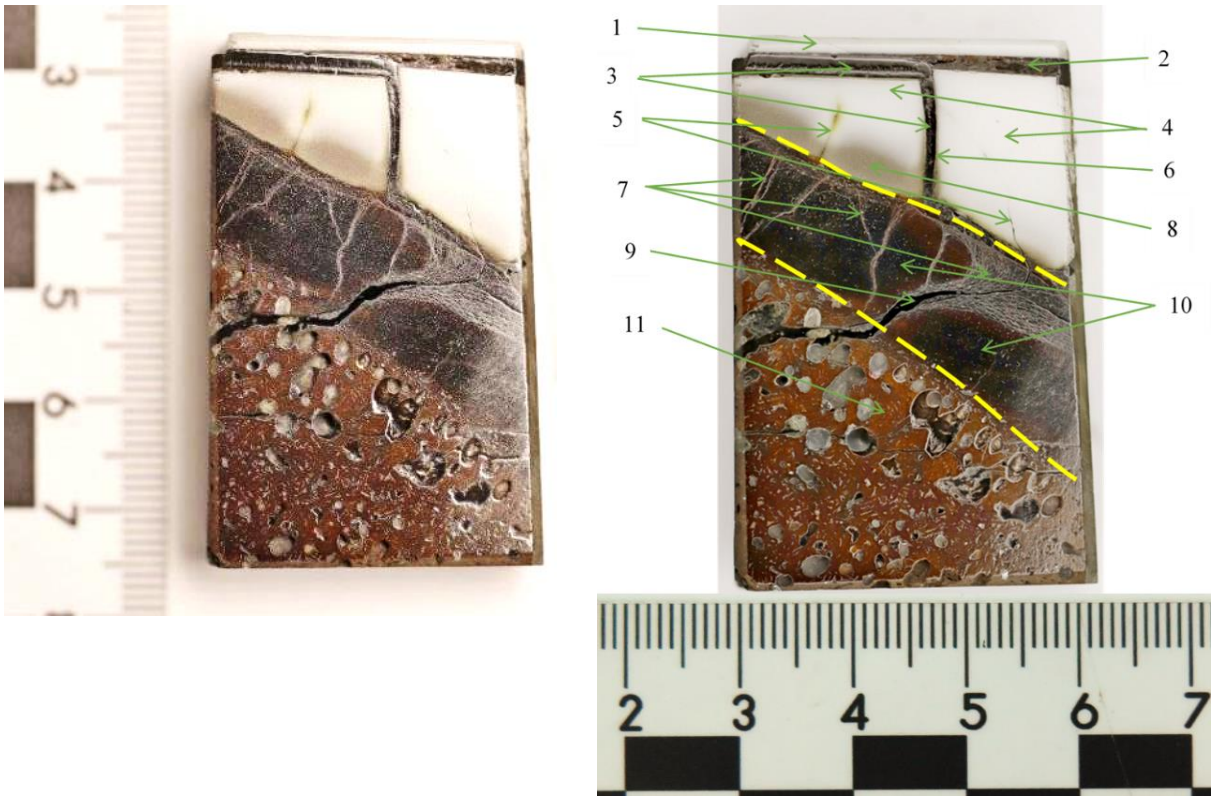


Рисунок 50 – Схема разделки пластины для материаловедческих исследований

Для материаловедческих исследований был изготовлен шлиф (из области D), включающий область максимальной эрозии керамического материала (рисунок 51). Подготовленный шлиф содержит близкий к диаметральному срез материалов в области границы контакта кориума с керамическим материалом.

Наряду с явной границей эрозии, характеризуемой резким переходом от структуры расплава кориума к структуре керамического материала, областью воздействия расплава на керамический материал являются также области видимой сохранившейся структуры материала из оксида алюминия на различном удалении от границы с расплавом. Показателями деградации свойств (опосредованной, вторичной, косвенной эрозии) являются признаки изменения структуры керамического материала, определяемые оптическими методами макроанализа, микроструктурных исследований и исследований прочностных свойств.

Подготовленный шлиф (рисунок 51а) содержит область эрозии керамического материала, области потемнения структуры (8), микротрещины (5) и макротрещины (6), а также области проникновения кориума в зазор между вставками и в макротрещину (3) в керамическом материале, сформированную, очевидно, в период проведения эксперимента. В структуре кориума и керамического материала имеются также и макротрещины (9), сформировавшиеся либо в процессах демонтажа ловушки и вырезки заготовок, либо в процессе остывания сборки в постэкспериментальный период, как минимум, уже после затвердевания расплава. Слой затвердевшего расплава кориума толщиной около 1 см вблизи границы контакта с керамическим материалом имеет плотную однородную структуру (10), отличающуюся от структуры кориума в остальной части сечения (11), которая характеризуется пористостью и наличием округлых металлических включений.



1 – внешняя вставка керамического материала; 2 – эпоксидная смола; 3 – кориум с темной структурой; 4 – внутренняя вставка керамического материала; 5 – микротрещины в

структуре керамического материала; 6 – макротрещины в структуре керамического материала; 7 – микротрещины в структуре кориума; 8 – область потемнения структуры керамического материала; 9 – макротрещина в структуре кориума; 10 – кориум с плотной темной структурой; 11 – кориум с пористой окрашенной структурой

а)



1 – макротрещина в структуре керамического материала; 2 – внутренняя вставка керамического материала; 3 – область потемнения структуры керамического материала; 4 – кориум с темной структурой;

б)

а)-шлиф, подготовленный для исследований б)-увеличенная область шлифа с областью микроструктурных исследований

Рисунок 51 – Внешний вид образца для материаловедческих исследований

Выбор области для изучения микроструктуры основывался на наличии первичного признака границы эрозии при визуальном осмотре. В качестве такого признака принималась резкая граница перехода темных структур, соответствующих кориуму и более светлых структур, соответствующих керамическому материалу. Изображение области изучения микроструктуры представлено на рисунке 52. Рассмотрение микроструктуры вдоль границы перехода при малом увеличении в светлом поле выявило наличие переходного слоя толщиной около 1,5 мм, микроструктура которого образована в основном зернами корунда и отвечает, таким образом, измененной структуре керамического материала. В рассеянном освещении (в темном поле) микроструктура выглядит темной ввиду ее оптической прозрачности и отсутствии отражающих граней зерен корунда, характерных для основной структуры. В этой области зерна корунда имеют округлые формы, промежутки между зернами заполнены полностью второй прозрачной фазой, коэффициент преломления которой и степень прозрачности, очевидно, очень близки к фазе корунда.

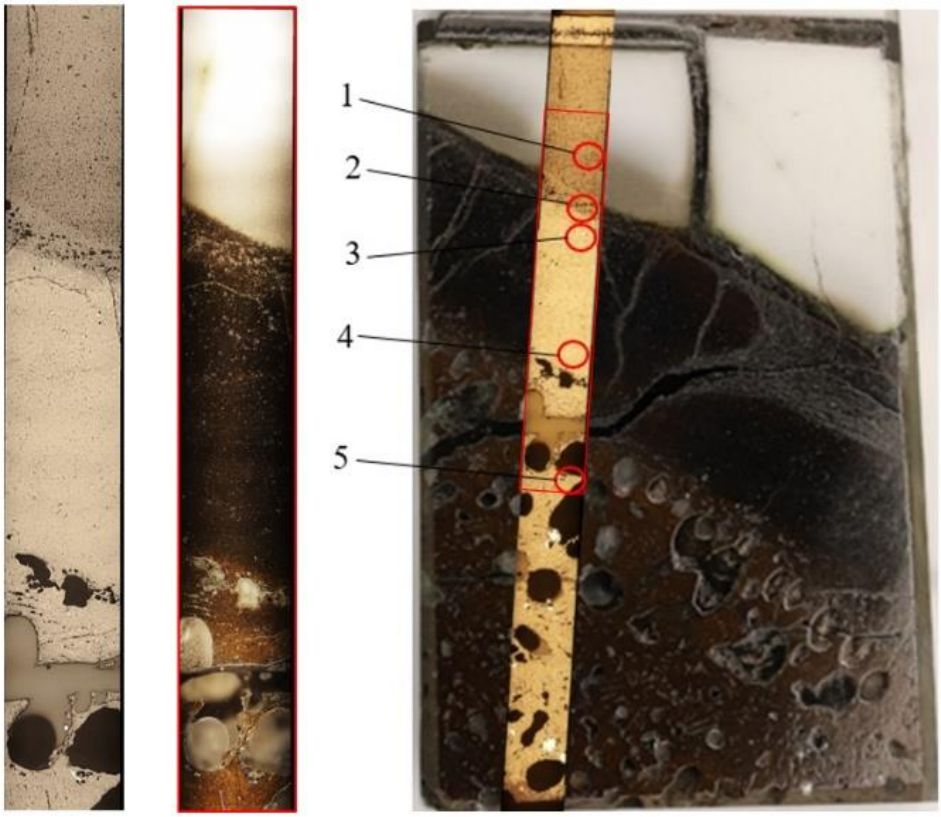
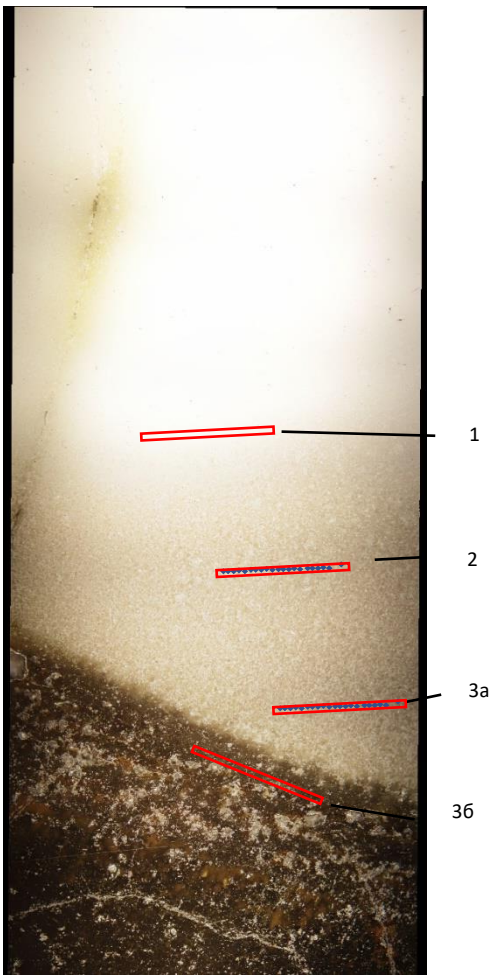
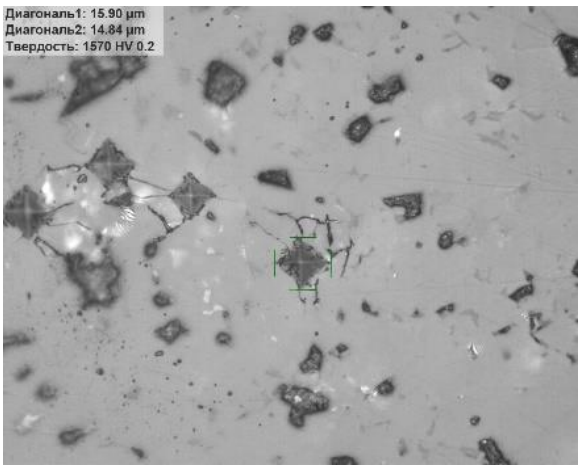


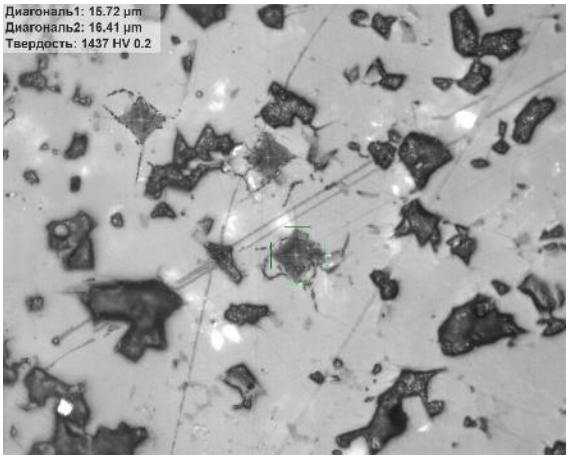
Рисунок 52 – Области шлифа образца для проведения исследований

Для выявления изменений структуры, которые могли бы повлиять на прочность керамического материала, были выполнены исследования изменений прочностной характеристики ЖМ, такой как микротвердость по Виккерсу. Измерения микротвердости проводились на автоматическом микротвердомере Qness с нагрузкой на инденторе 200 граммов (HV0.2). Размеры диагоналей отпечатков составляли величину порядка 15 мкм, что позволяло производить измерения размеров диагоналей с точностью порядка 1 мкм. На рисунке 53 приведена схема расположения областей для измерений микротвердости и характерный внешний вид отпечатков в каждой области.

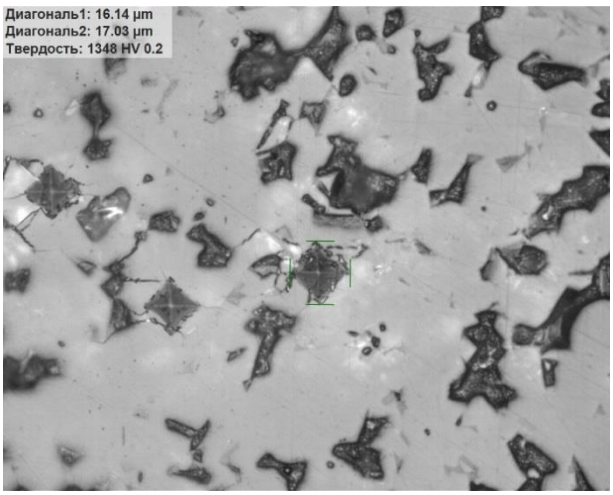




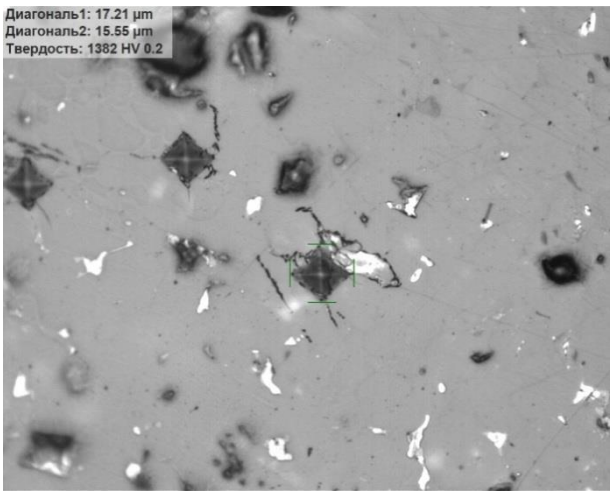
Область 1



Область 2



Область 3а



Область 3б

Рисунок 53 – Области определения микротвердости жертвенного материала и микрофотографии отпечатков в различных областях

Измерения проводились сериями по 21 измерению для каждой исследуемой области. Области 1-3 отвечали зоне видимого изменения структуры ЖМ, области 4-7 расположены в материале внутреннего цилиндра ЖМ, не имеющего видимых изменений, области 8-10 захватывали материал внешнего цилиндра ЖМ вблизи границы контакта с прослойкой кориума, проникшего в зазор между цилиндрами. В Таблице 6 приведены результаты

измерений микротвердости для областей в областях с потемневшей структурой.

Таблица 6 – Результаты определения микротвердости огнеупорного материала

№ Отпечатка	Значения микротвердости, $HV_{0.2}$			
	Область 1	Область 2	Область 3	
			а	б
1	1673	2134	1375	1682
2	1787	952	1848	1775
3	1713	1448	1444	1988
4	1684	1700	649	2006
5	1618	1776	1231	2162
6	1509	1681	1892	1831
7	2248	2102	1431	1883
8	1730	1762	973	1636
9	1570	1736	1539	1509
10	1703	1437	1167	1598
11	2029	1719	1605	1861
12	1910	1876	1533	1679
13	1498	2103	1348	1382
14	1563	1744	1543	1502
15	1720	1850	1639	1671
16	1837	2020	1719	1489
17	1788	1269	1516	1715
18	1209	1444	1522	1609
19	1904	2008	2116	1573
20	1786	1227	1671	1630
21	2115	820	1371	1941
Среднее	1743	1658	1482	1720
Станд. откл	227	366	317	199
Дов.инт. среднего (95%)	103	167	144	90

Анализ всей совокупности измерений показал, что распределение полученных значений близко к нормальному со средним значением 1690 единиц HV и дисперсией 270 единиц HV. Диапазон значений дисперсий в разных сериях измерений составил от 180 до 370 единиц HV. Обработка результатов измерений по каждой серии заключалась в расчете среднего

значения, стандартного отклонения и доверительного интервала среднего значения для доверительной вероятности 95% в соответствии с распределением Стьюдента. Наибольшее расширение дисперсий и, соответственно, увеличение доверительного интервала обуславливалось наличием измерений с очень низкими значениями микротвердости на уровне 600-900 единиц. Проверка по критерию Романовского, однако, не позволяла исключить эти результаты в каждой серии при уровне значимости 0,05. Сравнение средних значений микротвердости показало их равнозначность в пределах доверительных интервалов. Исключение составило значение микротвердости в области 3а, соответствующей потемневшей структуре ЖМ на самой границе с зоной переходной структуры. Существенно более низкое значение микротвердости в этой области оказалось также и при исключении аномально низких значений из результатов всех измерений.

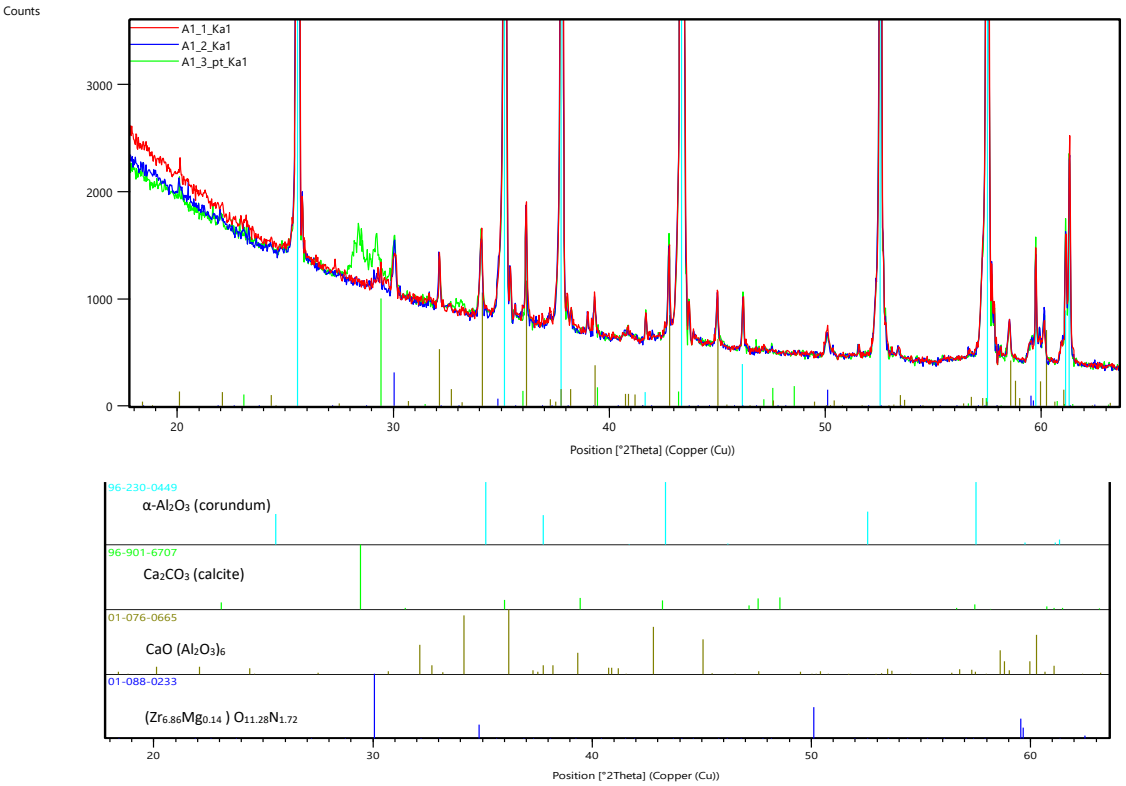
5.2 Фазовый и элементный состав модельного кориума после взаимодействия с Al_2O_3 – жертвенным материалом с кипящим свинцовым слоем

Для проведения рентгеноструктурных и СЭМ – ЭДС исследований [119] в области изучения микроструктуры были выбраны пять областей на разных участках. Схема расположения выбранных областей представлена на рисунке 52.

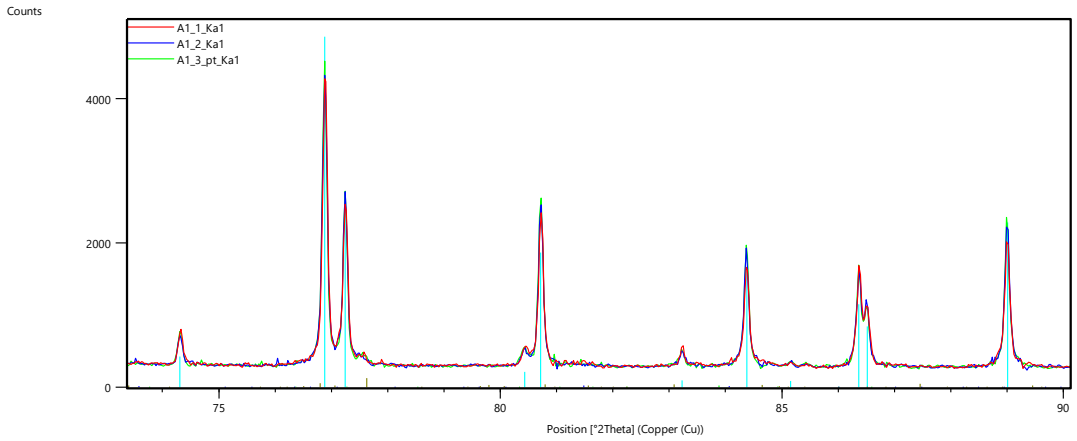
Участок 1 (керамический материал)

Данный участок представляет собой жертвенный материал с частично измененной относительно исходного состояния структурой. Изменения выражаются потемнением слоя материала, границы потемнения размытые. Толщина слоя потемневшего материала в большинстве случаев имеет величину около 5 – 7 мм, однако есть области, где потемнения структуры на границе эрозии практически отсутствуют.

Рентгеноструктурный фазовый анализ данного участка показал, что основной фазовый состав группы представлен корундом (α-Al_2O_3). Второстепенные фазы представлены хорошо идентифицируемой кристаллической фазой оксидов кальция и алюминия вида $CaO\ (Al_2O_3)_6$. Профили дифрактограмм в высокоугловой области практически совпадают, что говорит о достаточно малом размере кристаллитов, отсутствии или одинаковости преимущественной ориентации и одинаковости структурных характеристик фазы во всех областях (рисунок 54).



а) в средней угловой области углов, с пиками второстепенных фаз



б) в высокоугловой области с пиками основной фазы

Рисунок 54 – Сравнительный анализ дифрактограмм группы областей керамического материала

СЭМ - исследования позволили выделить и идентифицировать присутствие четырех кандидатных фаз с однородным элементным составом. Это - фаза на основе Al_2O_3 с содержанием этого компонента не менее 99.7%, фазы на основе Al_2O_3 с повышенным содержанием оксидов кальция и магния, фазы с высоким содержанием кремния, фазы с высоким содержанием циркония и иттрия (рисунок 55, таблица 7).

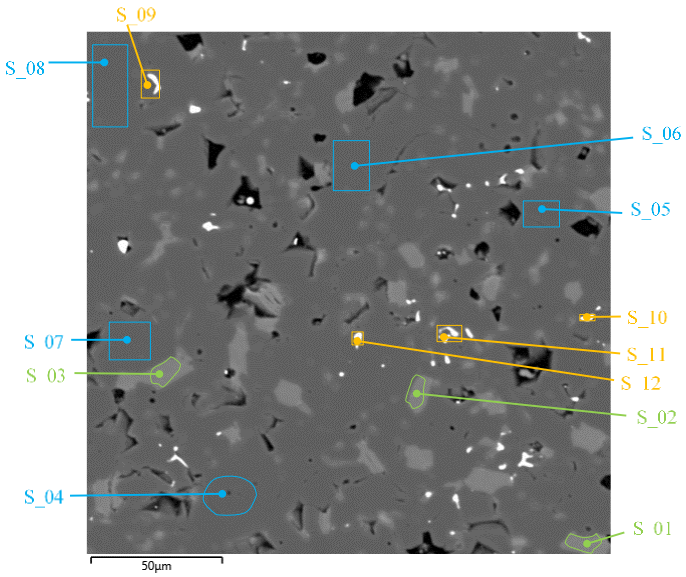


Рисунок 55 – Области для локального ЭДС - анализа участка 1

Таблица 7 - Результаты локального элементного ЭДС - анализа (цветом выделены группы областей однородного состава)

Оксид / Участок	Al_2O_3		SiO_2		CaO		MgO		ZrO_2	
	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %
Спектр 01	91,6	1	-	-	6,5	0,4	1,9	0,4	-	-
Спектр 02	91,2	1	-	-	6,9	0,4	1,9	0,4	-	-
Спектр 03	91,2	0.9	-	-	6,8	0,4	1,7	0,3	-	-
Спектр 04	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Спектр 05	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Спектр 06	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Спектр 07	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Спектр 08	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Спектр 09	86,6	1,1	3,1	0,5	1,1	0,2	-	-	9,2	0,2
Спектр 10	52,7	3,4	-	-	-	-	-	-	47,3	4,1
Спектр 11	80,2	1,5			1,6	0,3			18,2	1,5
Спектр 12	67,4	3,2	5,8	1,7	-	-	-	-	26,8	3,6

В результате рентгеноструктурного фазового анализа фазе на основе Al_2O_3 соответствует основа структуры керамического материала – зерна корунда. На границах зерен корунда расположены поры и выделения остальных фаз.

Участок 2 (переходная область взаимодействия кориума с керамическим материалом)

На рисунке 56 представлены результаты качественного анализа переходной области, расположенной, собственно, в области границы эрозии керамического материала. Основной фазовый состав представлен линиями высокой интенсивности фазы вида $(U,Zr,\ldots)O_{2\pm x}$ на основе тетрагональной кристаллической решетки пространственной группы P42/nmc и корунда (α-Al_2O_3). В качестве второстепенной фазы идентифицированы фазы вида $CaO\,(Al_2O_3)_6$. В области близкой к участку 1 керамического материала

твердый раствор $(U,Zr,\ldots)O_{2\pm x}$ практически отсутствует, основной фазой является корунд, второстепенными фазами идентифицированы CaO $(Al_2O_3)_6$ и фаза $Zr_{0,85}Ca_{0,15}O_{1,85}$ с кубической кристаллической решеткой и параметром решетки 0,5158 нм.

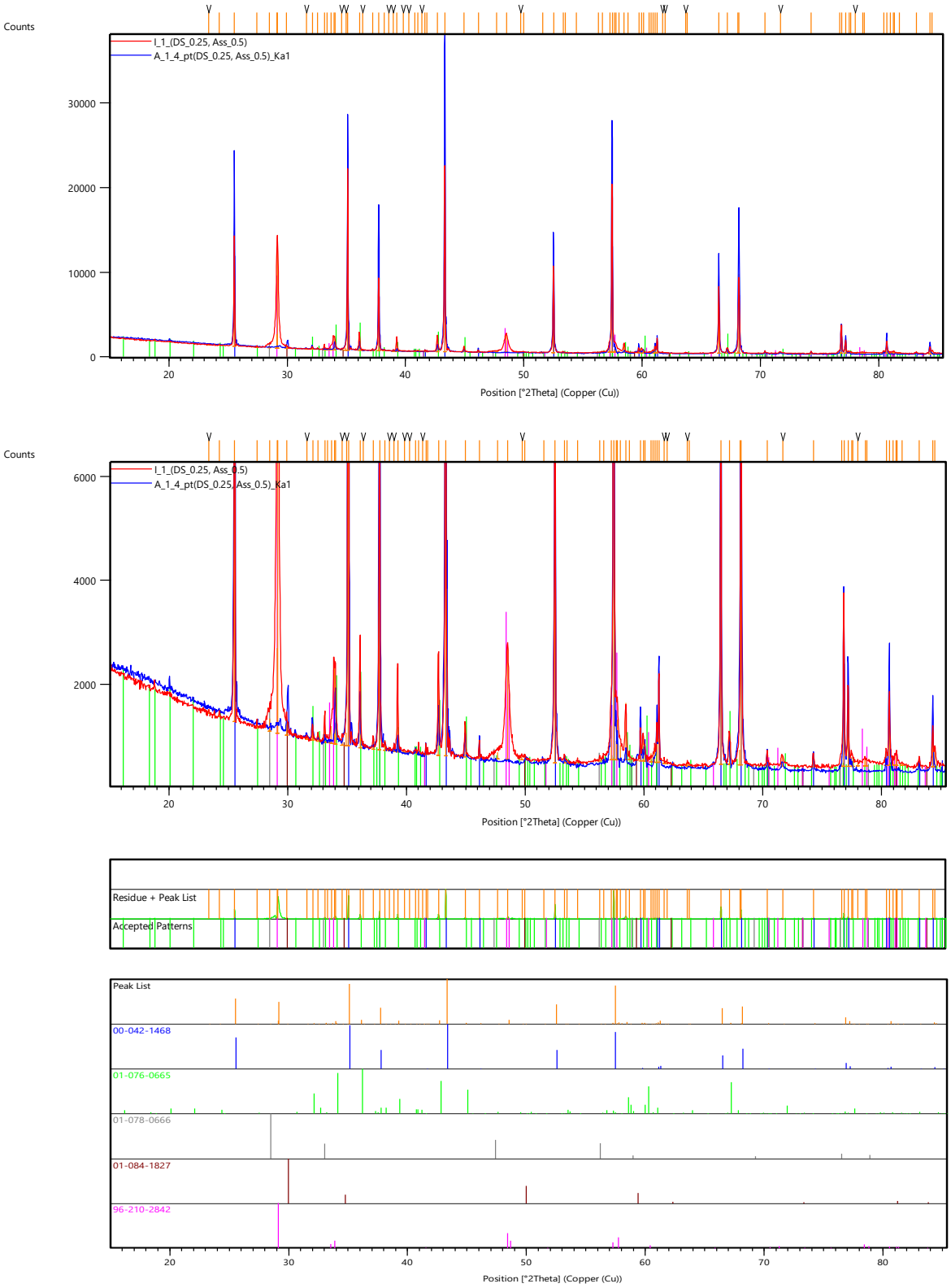


Рисунок 56 – Результаты фазового анализа переходной области участка 2 (без учета ограничений на химический состав) в сравнении с областью участка 1

Интенсивность линий, соответствующих фазе CaO $(Al_2O_3)_6$ в области участка 2 оказалась максимальной среди всех исследованных областей в 1.5-2 раза. Этот факт важен в связи с обнаруженным по результатам СЭМ-ЭДС - анализа скоплений фазы, имеющей схожий химический состав по содержанию CaO и Al_2O_3 (рисунок 57, таблица 8). В отличие от составов этой фазы в областях основного керамического материала, в составах переходной области присутствуют однородно распределенные компоненты кориума с увеличенным содержанием урана по отношению к цирконию.

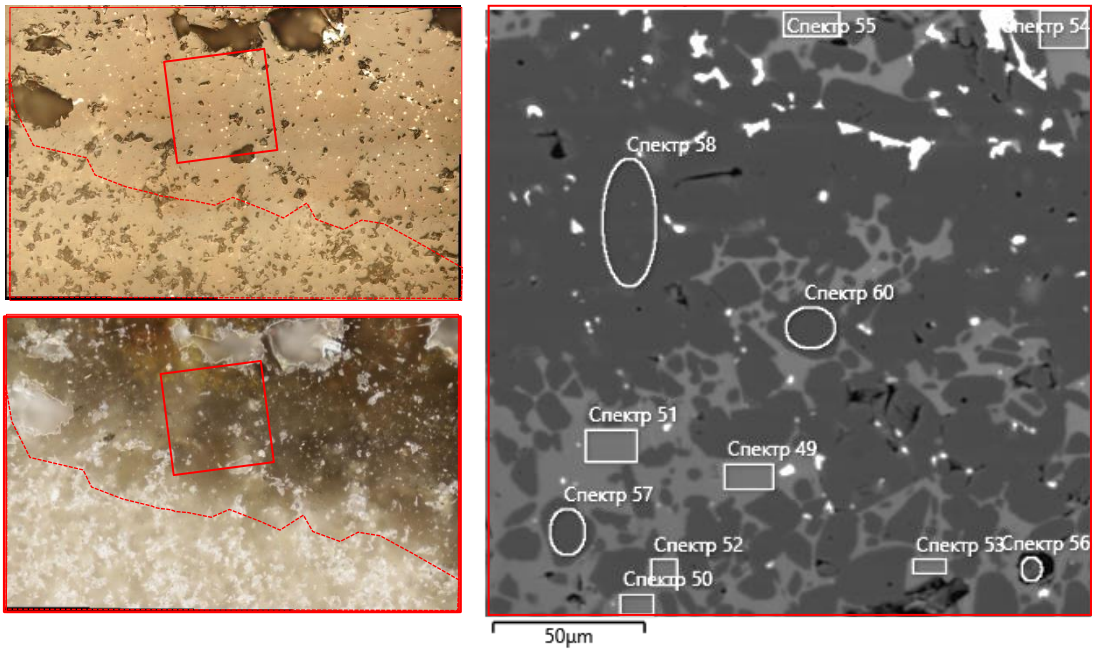


Рисунок 57 – Расположение областей локального ЭДС – анализа участка 2

Таблица 8. Результаты локального элементного ЭДС - анализа (цветом выделены группы областей однородного состава)

Оксид / Участок	Al_2O_3		SiO_2		CaO		MgO		ZrO_2		UO_2	
	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %
Спектр 49	87	1,1	-	0,3	6,3	0,3	1,4	0,3	0,1	0,6	5,1	0,8
Спектр 50	87,1	1,5	-	0,4	5,9	0,4	1,5	0,4	0,8	0,9	4,5	1
Спектр 51	86,3	0,8	-	0,3	5,8	0,3	1,6	0,2	-	0,5	6,0	0,6
Спектр 52	85	1,4	-	0,4	5,9	0,4	1,5	0,4	0,9	0,8	6,5	0,9
Спектр 53	87,4	1,7	-	0,6	5,5	0,5	1,6	0,2	1,4	1,0	4,3	1,2
Спектр 54	81,6	0,8	0,3	0,2	4,7	0,2	0,9	0,2	-	0,4	12,1	0,7
Спектр 55	80,9	1	-	0,3	4,6	0,3	1,2	0,3	0,5	0,5	12,5	0,8
Спектр 57	99,3	0,8	-	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4	-	0,5
Спектр 58	98,7	0,4	0,8	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	-	0,2	0,2	0,2
Спектр 60	99,5	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1	-	0,2	-	0,4	0,3	0,4
Спектр 56	7,3	0,8	89,6	2,1	0,8	0,4	-	0,4	1,9	1	0,3	1,1

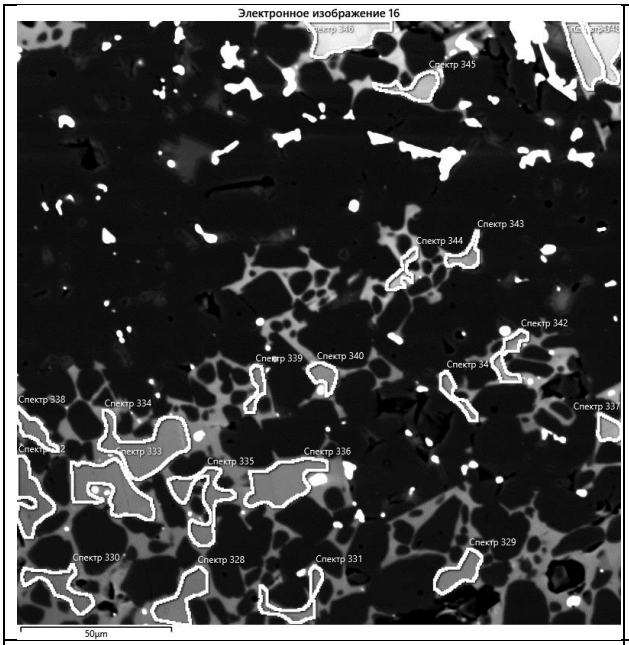
Рентгеноструктурные характеристики линий CaO $(Al_2O_3)_6$ в области участка 2, такие как угловое положение и полуширина, при явном присутствии

растворенных тяжелых компонентов кориума практически мало отличаются от характеристик линий фазы в основном массиве керамического материала.

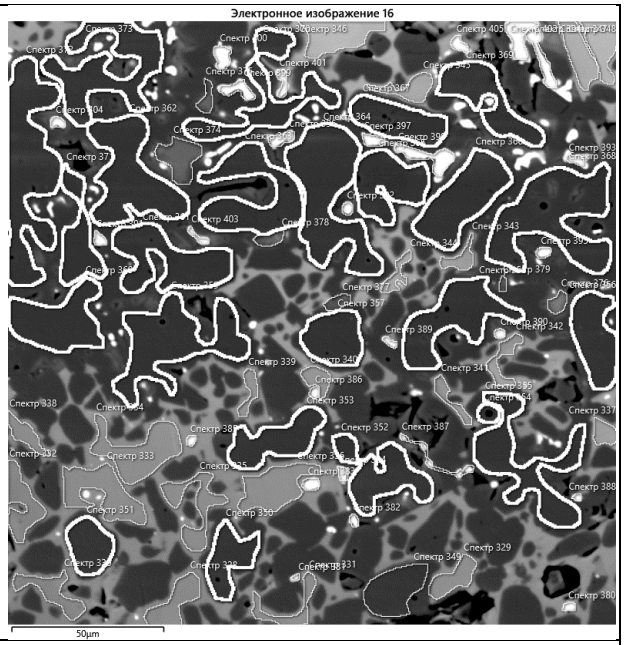
Соотношение интенсивности линий корунда в переходной области практически соответствует соотношениям в областях исходного керамического материала. Это говорит о том, что в области отсутствует преимущественная ориентация кристаллитов, которая могла бы возникнуть, например, при кристаллизации зерен этой фазы из расплавленного состояния при наличии направленного теплового потока.

Общий вид расположения зерен корунда (рисунок 58, таблица 9) в сочетании с другими структурными выделениями вплоть до границы с кориумом позволяет предположить условия формирования переходной области при температурах ниже температуры плавления оксида алюминия.

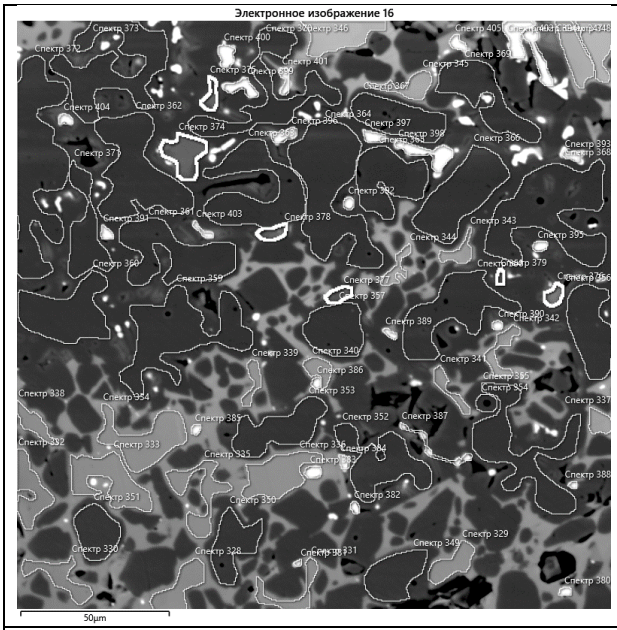
Наблюдаемые зерна оксида алюминия (самые темные на СЭМ - изображениях) являются зернами исходной структуры керамического материала, претерпевшими частичное растворение. Проникновение компонентов кориума, при этом происходило по межзеренным границам за счет диффузии и, наиболее вероятно через присутствующую в переходной области жидкую фазу. Кандидатами на жидкую фазу в области взаимодействия является $CaO\ (Al_2O_3)_6$ (температура плавления 1830 °С) и эвтектическая жидкая фаза системы кориум - Al_2O_3, оценочная температура кристаллизации которой находится на уровне 1900 °С.



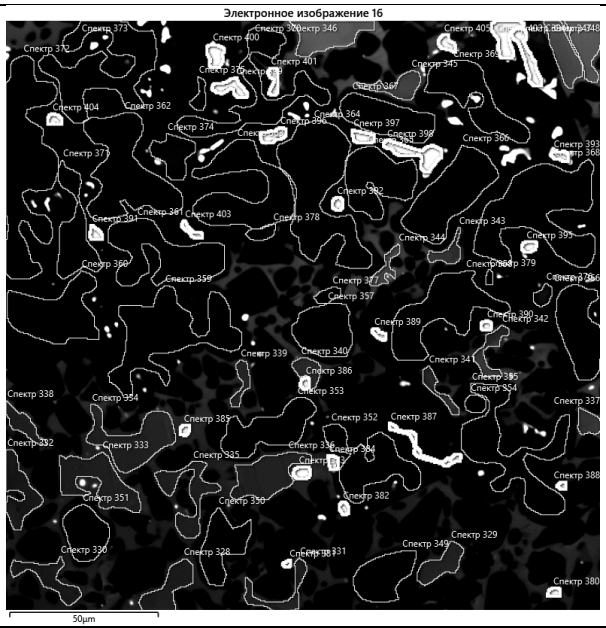
Области получения спектров 328-348



Области получения спектров 349-373



Области получения спектров 374-379



Области получения спектров 380-405

Рисунок 58 – Расположение областей локального ЭДС – анализа участка 2

Таблица 9. Результаты локального элементного анализа структурных составляющих (цветом выделены группы областей однородного состава)

Оксид / Участок	Na_2O		Al_2O_3		SiO_2		CaO		MgO		ZrO_2		UO_2	
	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %	C, %	σ, %
Спектр 328-347			86,7	0,9	0,16	0,18	5,7	0,5	1,5	0,2	0,5	0,4	5,4	1,4
Спектр 338-348			84,9	1,6	0,21	0,18	5,2	0,6	1,5	0,4	0,3	0,5	7,9	2,2
Спектр 349-373			99,6	0,4	0,3	0,3	0,06	0,07	0,04	0,05	0,05	0,08	0,03	0,06
Спектр 374-379	2,8	1,5	77	16	14	13	4,1	3,1	1	1,2	0,2	0,5	0,6	0,9
Спектр 380-390,392	-	-	34,7	9,5	**31,1**	5,3	1,6	0,7	0,5	0,6	**26,4**	4,3	5,8	3,1
Спектр 395-405	0,71	0,53	37,7	6,3	2,7	2,7	1,2	0,8	0,26	0,3	27,6	5,8	30,6	7,4

Результаты линейного анализа изменений элементного состава вблизи границы взаимодействия (рисунки 59 и 60) в целом соответствуют приведенному выше описанию. Резкое изменение концентраций оксида алюминия и компонентов кориума характеризует положение собственно границы кориум – Al_2O_3. Проникновение компонентов кориума в структуру керамического материала фиксируется до глубины порядка 0,8 мм с практически линейным падением концентраций урана и циркония. Проникновение оксида алюминия в структуре кориума более весомое, и по наблюдаемому изменению концентрации компонентов кориума, также почти линейно снижается в пределах исследованной области.

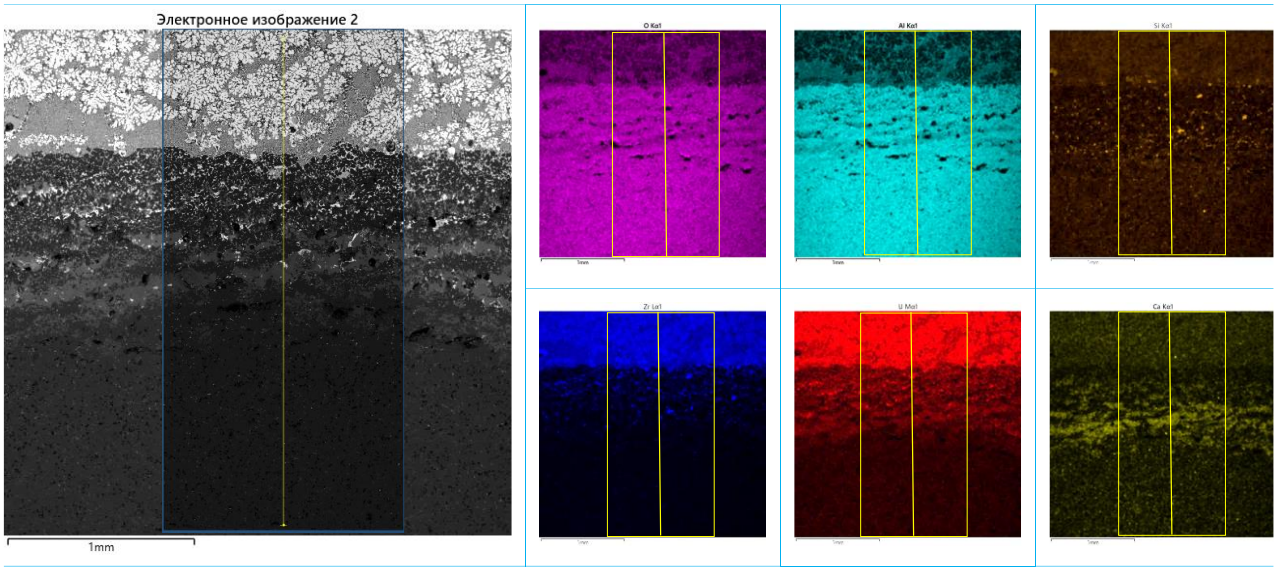


Рисунок 59 – Микроструктура, распределение интенсивностей ЭДС - спектров и расположение области линейного анализа в переходной области структуры керамического материала на границе эрозии

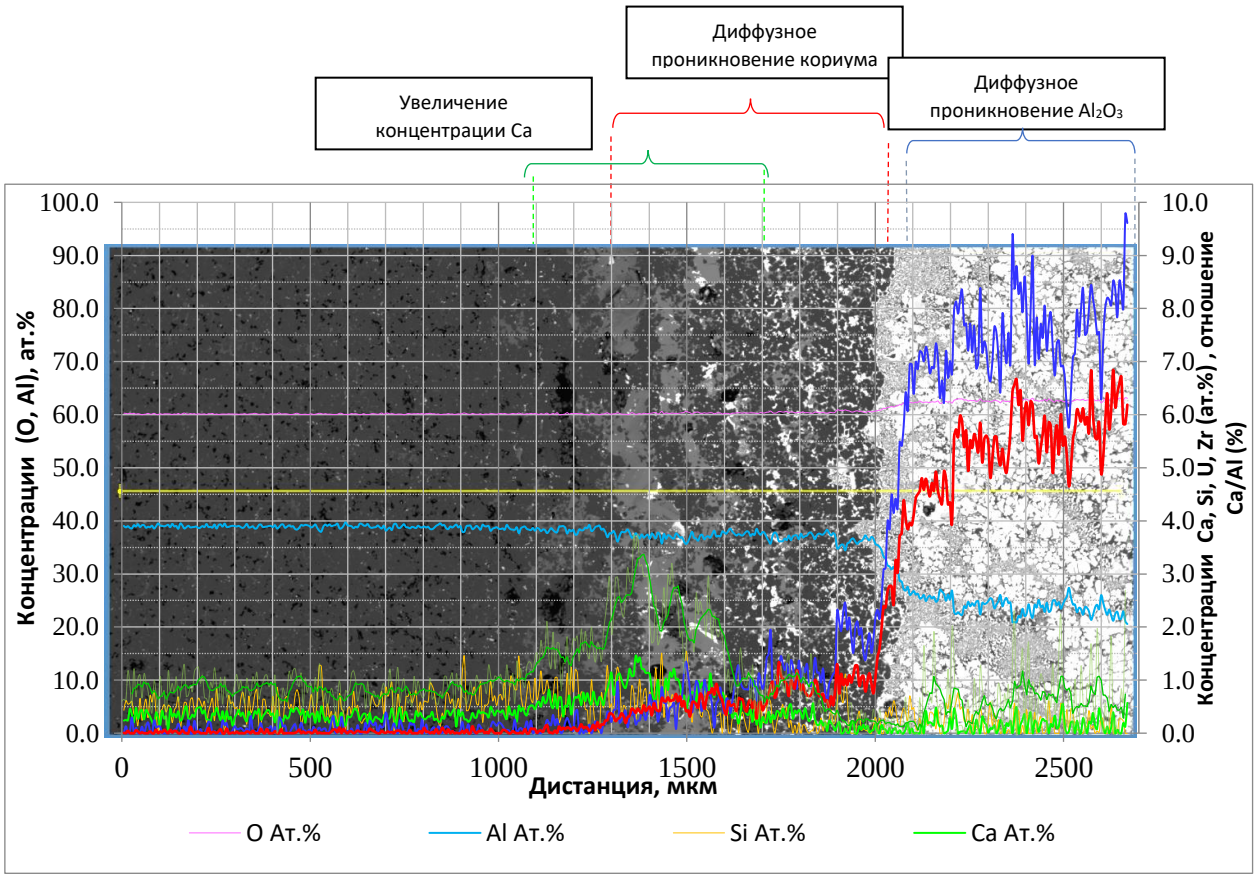


Рисунок 60 – Распределение элементного состава на границе эрозии оксида алюминия

Участки 3 и 4 (темный плотный кориум)

На рисунке 61 представлены результаты качественного анализа области темного плотного кориума (участки 3 и 4). Как показывает результат анализа, основной фазовый состав представлен твердыми растворами вида $(U,Zr,\ldots)O_{2\pm x}$ на основе тетрагональной кристаллической решетки пространственной группы P42/nmc и корундом (α-Al_2O_3). В качестве второстепенной фазы хорошее соответствие нашлось для фазы вида $CaO(Al_2O_3)_6$, идентифицированной и в фазовом составе области керамического материала.

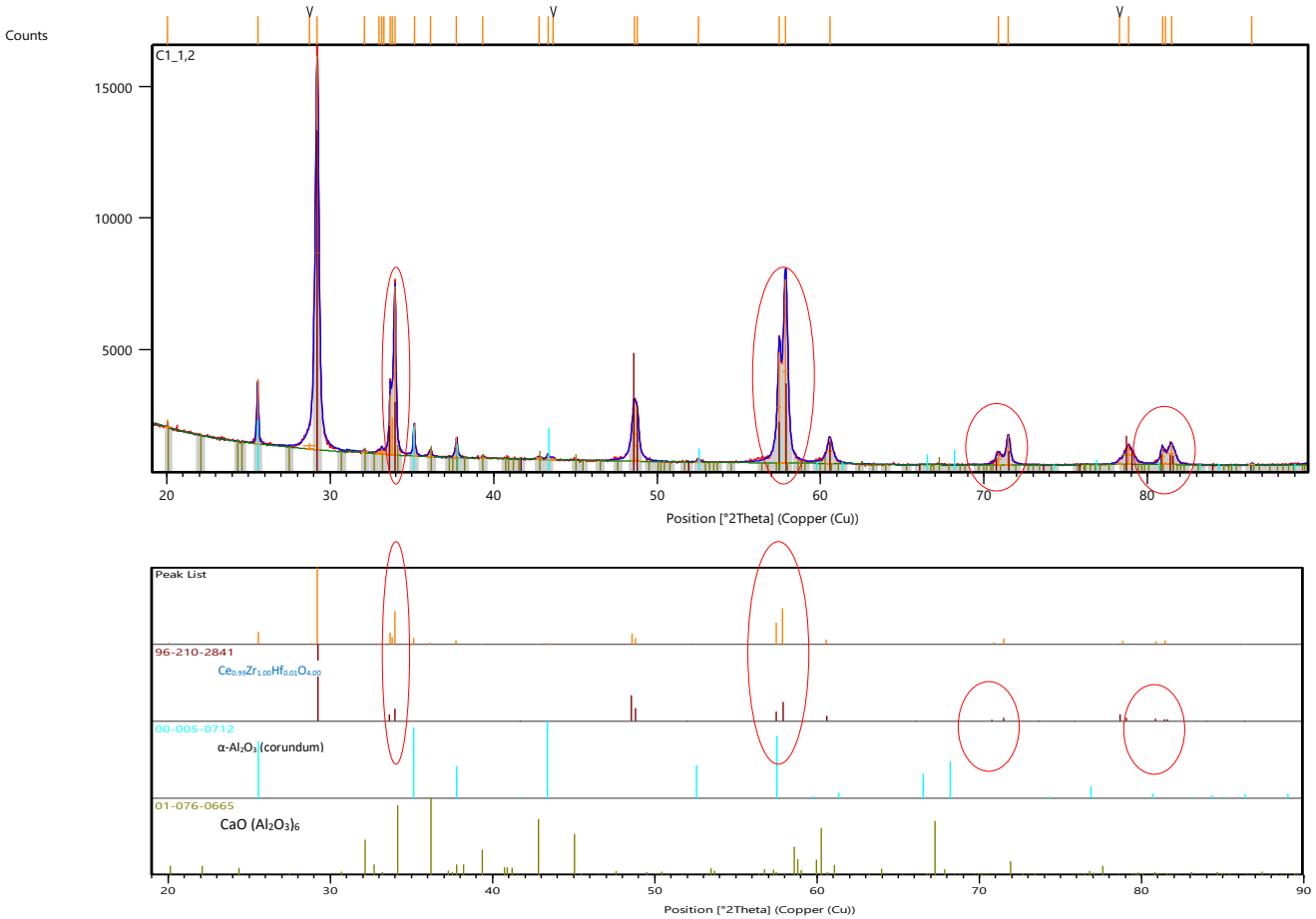


Рисунок 61 – Результаты фазового анализа области плотного темного кориума без учета ограничений на химический состав

Сравнительный анализ дифрактограмм областей этого участка кориума (рисунок 62) показал общую идентичность рефлексов, отвечающих за топливную составляющую материала. Основные различия обусловлены, в первую очередь, интенсивностью линий корунда в малоугловой области дифрактограмм, где в область рентгенографирования захватывалась область керамического материала. Такая тенденция сохранилась и высокоугловой области с размером поля рентгенографирования на уровне 4,5 мм, что может быть уже связано и с действительным повышенным содержанием фазы α-Al_2O_3 в этой области структуры кориума.

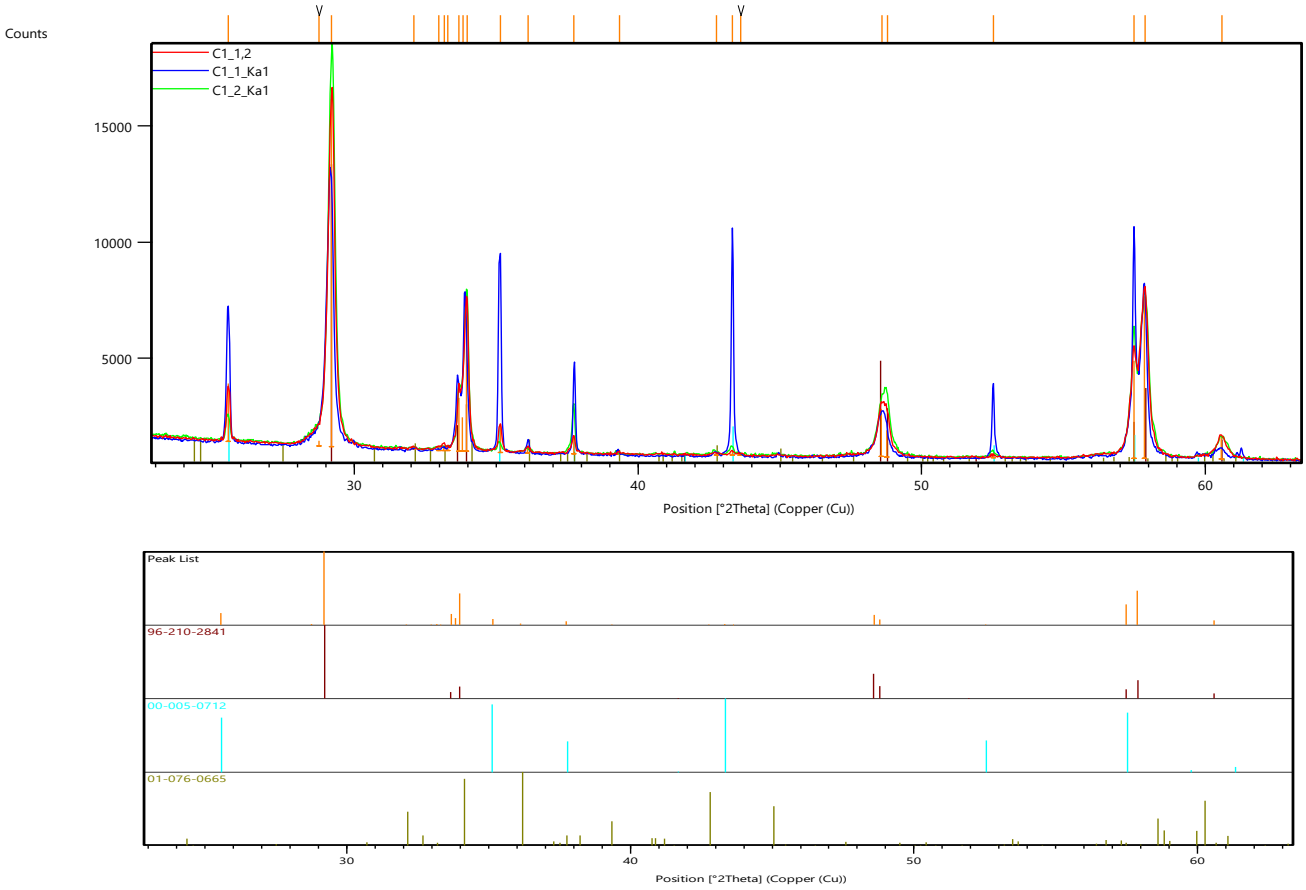


Рисунок 62 – Сравнительный анализ дифрактограмм группы областей участков 3 и 4

ЭДС - спектр участка показывает, что микроструктура кориума в этих областях образована довольно крупными выделениями фазы, состоящей из циркония и урана в оксидной форме, окружающих эти зерна фаз на основе оксида алюминия и эвтектических областей на основе этих фаз. Соотношение содержаний урана и циркония в выделениях топливных компонент достаточно постоянно и их усредненный состав может быть выражен формулой $(UO_2)_{0,441\pm0,005}(ZrO_2)_{0,559\pm0,009}$ (рисунок 63, таблица 10) для всех исследованных крупных выделений в области, соответствующей участку 3, $(UO_2)_{0,443\pm0,005}(ZrO_2)_{0,557\pm0,01}$ для 17 областей и $(UO_2)_{0,412\pm0,008}(ZrO_2)_{0,588\pm0,015}$ для еще 7 областей этих выделений в микроструктуре, соответствующей участку 4 (рисунок 64, таблица 11).

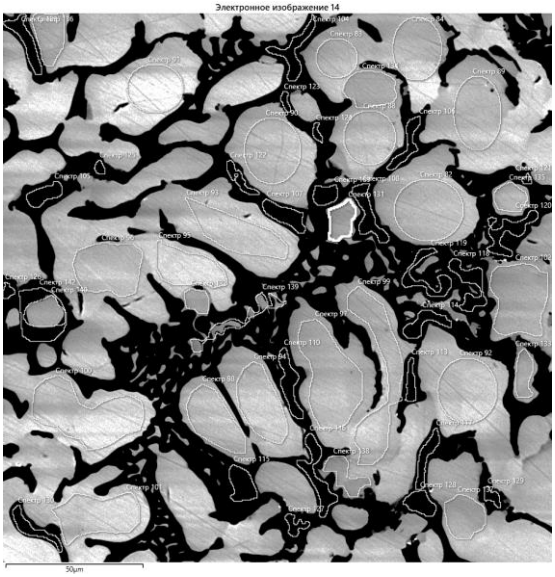


Рисунок 63 – Расположение областей локального ЭДС – анализа участка 3

Таблица 10. Результаты локального элементного анализа структурных составляющих (цветом выделены группы областей однородного состава)

Оксид / Участок	Al_2O_3		SiO_2		CaO		MgO		ZrO_2		UO_2	
	С, %	σ, %	С, %	σ, %	С, %	σ, %	С, %	σ, %	С, %	σ, %	С, %	σ, %
Спектр 81-102	0,24	0,12	0,06	0,08	0,03	0,07	0,06	0,06	36,5	0,5	63,1	0,5
Спектр 131-138	0,43	0,27	0,14	0,21	0,05	0,08	0,09	0,11	36,7	1,1	62,6	1,2
Спектр 139-142	19	7,9	0,03	0,06	0,03	0,02	0,05	0,04	31,2	2,9	49,6	4,9
Спектр 143-146э	55,89	4,28	0,01	0,02	0,11	0,06	-	-	17,4	1,6	26,6	2,7
Спектр 103-120	96,7	1,6	0,1	0,2	0,07	0,07	0,05	0,08	1	0,7	2	1
Спектр 121-129	72,6	7	0,9	0,8	3,2	0,9	1,3	0,7	5,4	2,5	16,6	3,9

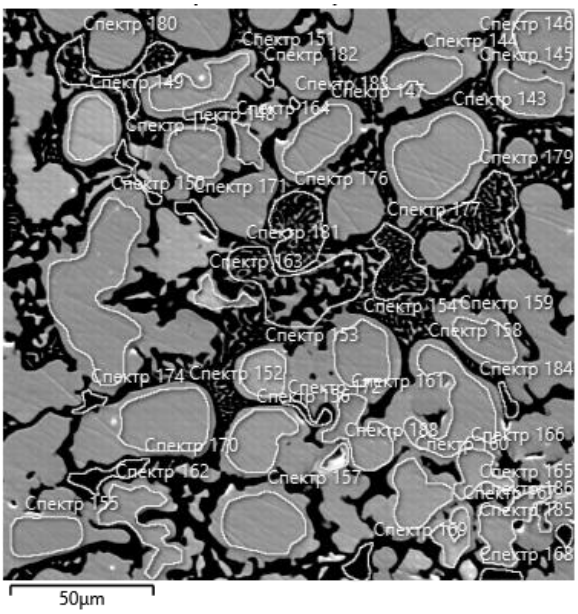


Рисунок 64 – Расположение областей локального ЭДС – анализа участка 4

Таблица 11. Результаты локального элементного анализа структурных составляющих (цветом выделены группы областей однородного состава)

Оксид / Участок	Al_2O_3		SiO_2		CaO		MgO		ZrO_2		UO_2		Cr_2O_3	
	С, %	**σ, %**	**С, %**	**σ, %**	**С, %**	**σ, %**	**С, %**	**σ, %**	**С, %**	**σ, %**	**С, %**	**σ, %**	**С, %**	**σ, %**
Спектр 143-160	0,24	0,13	0,03	0,05	-	-	0,06	0,08	36,4	0,6	63,3	0,6	-	-
Спектр 161-167	1,79	2,21	0,03	0,05	0,218	0,241	0,1	0,1	38,5	0,5	59,3	2,2	-	-
Спектр 176-181	48,6	2,3	0,04	0,05	0,054	0,049	0,07	0,09	20,7	1	30,6	1,3	-	-
Спектр 168-174	97,13	1,52	0,04	0,09	0,047	0,064	0,05	0,04	1	0,7	1,8	1	-	-
Спектр 182-184	78	2,1	0,92	0,89	5,117	0,692	0,76	0,35	5,2	1	10	0,7		
Спектр 185	7,5	0,6	**18,3**	0,92	0,3	0,24	0,7	0,36	**24,6**	1,3	4,6	0,9	**44**	1.15
Спектр 186	0,6	0,4	**10**	0,74	0,3	0,31	0,4	0,36	**34,9**	1,4	**40,6**	1,4	13,3	0,75

Выделения с повышенным относительным содержанием циркония удается наблюдать на электронно-микроскопических изображениях с дополнительном контрастированием изображений. Часть из этих 7-ми выделений имеют меньшие размеры и окружены выделениями легкой фазы, часть же ничем существенно не отличаются по форме или расположению от остальных 17-ти областей, где содержание циркония в растворе чуть ниже. Повышенное содержание циркония в твердом растворе $(U,Zr)O_{2\pm x}$ оказалось характерным для относительно мелких одиночных и эвтектических выделений этой фазы. В области участка 3 (спектры 139-146, таблица 10) усредненный состав фазы в эвтектиках $(UO_2)_{0,411\pm0,002}(ZrO_2)_{0,589\pm0,004}$, в области участка 4 состав фазы в эвтектиках $(UO_2)_{0,403\pm0,004}(ZrO_2)_{0,597\pm0,007}$ (спектры 176-181, таблица 11).

Участок 5 (более светлый пористый кориум)

Основной фазовый состав группы представлен серией широких пиков, хорошо соответствующих фазам с ГЦК - решеткой и параметром решетки 0.528 нм. В отличие от дифрактограмм предыдущей группы, в совокупности пиков отсутствуют соответствующие раздвоенные профили пиков. Как показывает результат анализа, основной фазовый состав представлен твердыми растворами вида $(U,Zr,\ldots)O_{2\pm x}$ на основе, предположительно, кубической кристаллической решетки пространственной группы Fm3m, корундом (α-Al_2O_3) и фазой, имеющей хорошее соответствие фазе вида $CaO\,(Al_2O_3)_6$. Результаты идентификации фазового состава с использованием этой фазы приведены на рисунке 65.

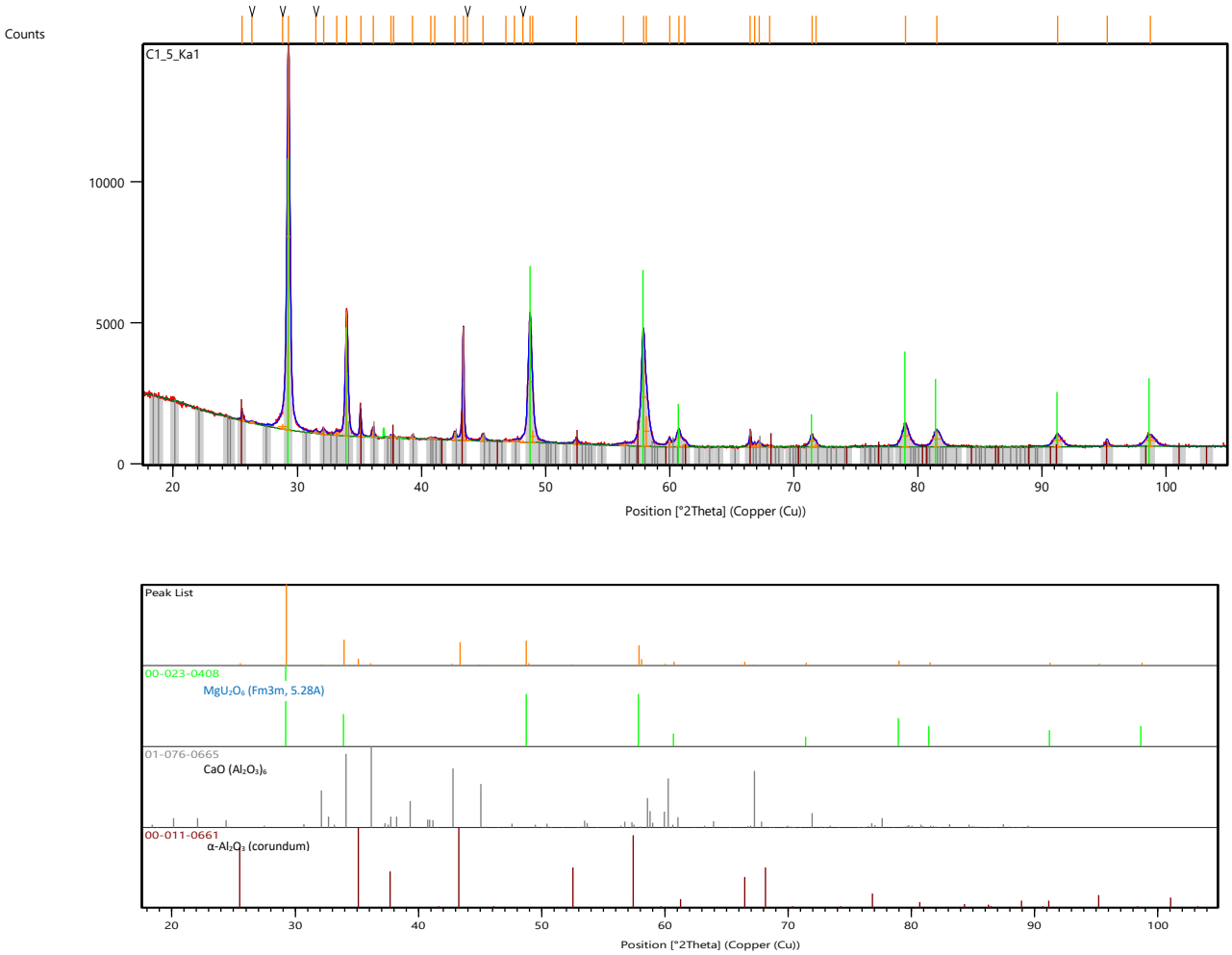
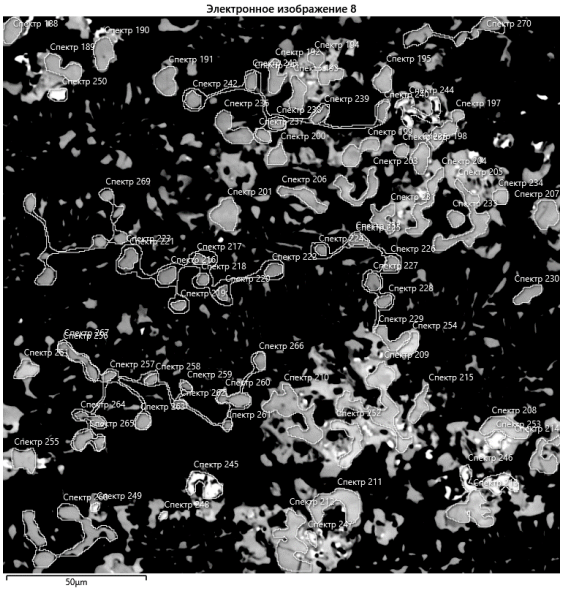
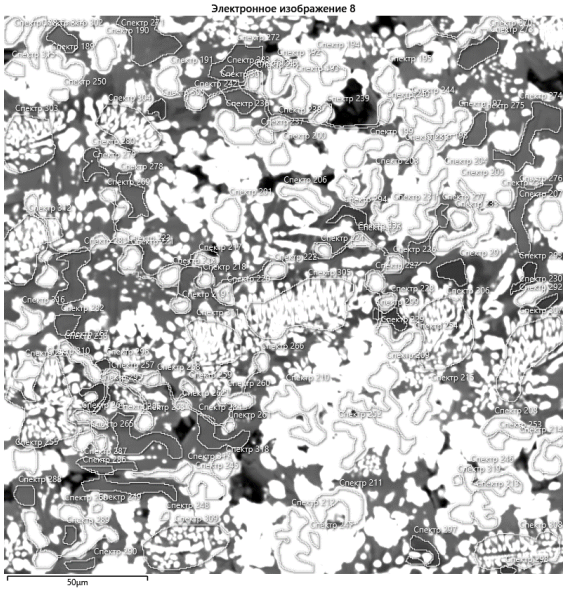


Рисунок 65 – Результаты фазового анализа области участка 5 без учета ограничений на химический состав

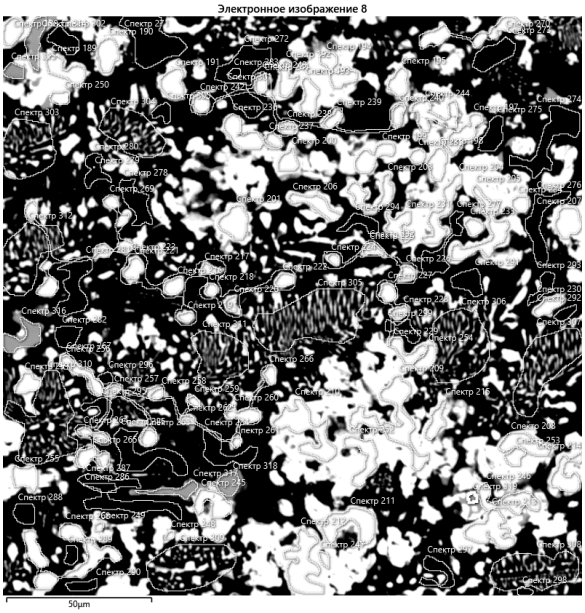
Анализ электронного изображения в отраженных электронах и карт распределения интенсивностей линий элементов в ЭДС - спектре участка показывает, что в значительной степени выделениям корунда соответствуют области эвтектик. Очевидно, что при кристаллизации эвтектики с образованием нитевидных выделений одной из фаз, вполне вероятным является образование одинаково ориентированных кристаллитов в пределах целой области эвтектики как одной, так второй фазы. На электронно-микроскопическом изображении явно наблюдаются области эвтектических выделений с вытянутыми выделениями фазы на основе урана и циркония, соответствующие фазе $(U,Zr,\ldots)O_{2\pm x}$, второй фазе в эвтектиках соответствуют корунд и/или $CaO\,(Al_2O_3)_6$ (рисунок 66, таблица 12). Таким образом, нарушения соотношений интенсивности отражений корунда вполне могут быть обусловлены ориентированным расположением кристаллитов этой фазы в пределах эвтектик, где она в основном и содержится.



а) Расположение областей локального ЭДС - анализа состава топливной компоненты кориума (спектры 188-270)



б) Расположение областей локального ЭДС - анализа состава легкой компоненты кориума (спектры 271-302), эвтектики (спектры 271-302)



в) Расположение областей локального ЭДС - анализа состава металлической компоненты кориума (спектры 314-319)

Рисунок 66 – Результаты микроструктурных исследований в области кориума участка 5

Таблица 12. Результаты локального элементного анализа структурных составляющих (цветом выделены группы областей однородного состава)

Оксид / Участок	Al_2O_3		SiO_2		CaO		MgO		ZrO_2		UO_2	
	С, %	σ, %	С, %	σ, %	С, %	σ, %	С, %	σ, %	С, %	σ, %	С, %	σ, %
Спектр 188-215	0,5	0,4	0,09	0,15	1	0,4	0,06	0,1	36,1	1,1	62,2	1,4
Спектр 216-222	3,6	1,2	0,07	0,17	1,3	0,5	0,4	0,3	37	1,1	57,6	1,2
Спектр 224-231	3,9	2	0,14	0,29	0,5	0,3	0,3	0,4	35,5	2	59,8	2,8

Спектр 233-242	3,6	2,4	0,12	0,21	1,3	0,5	0,24	0,26	35,9	2,2	58,8	2,1
Спектр 256-266	5,1	2,5	0,2	0,3	1,4	0,4	0,15	0,3	35,9	2,3	57,3	2,6
Спектр 216-266	4,1	2,2	0,13	0,22	1,2	0,6	0,25	0,29	36	1,9	58,3	2,4
Спектр 223, 232, 243, 267-270	23	8	0,12	0,12	2,1	0,6	0,22	0,13	29,2	2,9	45,8	5,8
Спектр 244-250	3,2	4,1	4,5	3	1,2	0,7	0,09	0,08	22	5	69	6
Спектр 251-254	1,1	1,4	0,6	0,5	0,6	0,4	-	-	30,6	1,8	67,1	2,3
Спектр 271-280	84,5	1	0,17	0,13	6,8	0,3	0,9	0,2	3,1	0,5	4,5	0,8
Спектр 281-290	85,4	0,9	0,35	0,27	6,9	0,5	0,9	0,4	2,5	0,5	4	0,8
Спектр 271-290,301,302	85,1	1,1	0,25	0,22	6,9	0,4	0,9	0,3	2,8	0,6	4,1	0,9
Спектр 291-300	94,37	3,6	0,07	0,13	1,296	0,95	0,16	0,19	1,6	1,4	2,5	1,6
Спектр 303-312_эвт	52,17	2,38	0,1	0,16	2,551	1,28	0,23	0,14	17,8	0,9	27,1	1,9
Спектр 314-319	1,5	1,2	21,4	0,5	0,58	0,17	-	0,15	71,7	1,1	4,9	1,5

Анализ электронного изображения в отраженных электронах и карт распределения интенсивностей линий элементов в ЭДС - спектре участка показывает, что структуры кориума в этих областях образованы существенно менее крупными по сравнению с участком 4 выделениями фазы, состоящей из циркония и урана в оксидной форме, окружающих эти зерна фаз на основе оксида алюминия и эвтектических областей на основе этих фаз. Соотношение содержаний урана и циркония в объединенных выделениях топливных компонент имеет заметное непостоянство для разных зерен. Усредненный состав может быть выражен формулой $(UO_2)_{0,440\pm0,011}(ZrO_2)_{0,560\pm0,020}$ (таблица 12, спектры 188-215) для всех исследованных крупных выделений, $(UO_2)_{0,425\pm0,016}(ZrO_2)_{0,575\pm0,030}$ для одиночных топливных выделений (таблица 12, спектры 216-242), $(UO_2)_{0,505\pm0,020}(ZrO_2)_{0,495\pm0,034}$ для ряда областей в крупных скоплениях фазы (таблица 12, спектры 251-254), $(UO_2)_{0,62\pm0,03}(ZrO_2)_{0,38\pm0,05}$ в ряде самых мелких выделений топливной фазы (таблица 12, спектры 244-250). Выделения с различным относительным содержанием циркония и урана удается выделить и наблюдать на электронно-микроскопических изображениях с дополнительном контрастированием изображений.

Повышенное содержание циркония в твердом растворе $(U,Zr)O_{2\pm x}$ оказалось характерным для относительно мелких одиночных и эвтектических выделений этой фазы. В области участка 5 (спектры 303-312 в таблице 12) усредненный состав фазы в эвтектиках $(UO_2)_{0,410\pm0,006}(ZrO_2)_{0,590\pm0,011}$.

5.3 Физико-химические преимущества оксида алюминия и свинцового слоя в качестве жертвенного материала ловушки расплава легководного реактора

Ранее, при разработке концепции локализации расплава кориума в ловушке расплава были установлены требования к жертвенным материалам [48]. Одним из таких требований была способность жертвенных материалов окислять наиболее сильные восстановители, присутствующие в составе кориума, особенно металлический цирконий. Также важным аспектом являлось разбавление кориума, содержащего делящие материалы, что способствовало уменьшению плотности энерговыделения от продуктов

деления. Выполнение этих требований связано с вопросами водородобезопасности и обеспечения ядерной подкритичности системы.

На основе проведенного фазового анализа исследованных образцов был сделан вывод об активном окислении металлического циркония оксидом алюминия. Такой вывод был сделан на основании полученных результатов, в которых было установлено близкое соотношение состава твердых растворов исходному соотношению урана и циркония в шихте модельного кориума.

Строго говоря, исходное соотношений диоксидов урана (16,5 кг) и циркония (1,5 кг) соответствовало составу $(UO_2)_{0,834}(ZrO_2)_{0,166}$, с учетом металлического циркония (7,5 кг) при полном его окислении состав шихты соответствовал бы формуле твердого раствора $(UO_2)_{0,393}(ZrO_2)_{0,607}$, что очень близко к составам, обнаруженным для кориума вблизи границы с керамическим материалом.

Это говорит о том, что в процессе проведения эксперимента металлический цирконий окислялся корундом. На восстановление 7.5 кг циркония потребуется 8.4 кг или около 2 $дм^3$ оксидного материала. При диаметре ловушки 200 мм и средней глубине эрозии 10 мм на высоте 100 мм масса прореагировавшего оксидного материала составит 0.65 $дм^3$, что недостаточно для окисления всего объема кориума, но более чем достаточно для окисления циркония в слое кориума толщиной около 20 мм. Окисленный кориум имеет существенно большую, чем субокисленный температуру ликвидуса и будет стремиться образовывать твердую корку, через которую и будет осуществляться процесс взаимодействия с ОМ. Взаимодействие оксида алюминия с полностью окисленным кориумом приводит к образованию жидкости эвтектического состава с температурой солидуса (порядка 1900 °С) на 100-150°С ниже температуры плавления оксида алюминия (порядка 2060°С) и кристаллизации зерен твердого раствора (2300°С-2500 °С, в зависимости от состава. Очевидно, что процессы массопереноса продуктов взаимодействия и диффузии компонентов взаимодействующих материалов эффективнее будут происходить в этой жидкой фазе. В случае ее удаления «выдавливанием», либо за счет движения кориума, например, вследствие выхода газообразных паров свинца процессы взаимодействия могут активизироваться. Выход паров свинца может также активировать процессы восстановления оксида алюминия, что также должно способствовать усилению эрозии.

Еще одним преимуществом использования жертвенного материала на основе оксида алюминия с кипящим свинцовым слоем является то, что кипение свинца во время взаимодействия с кориумом способствует снижению темпа роста температуры кориума, однако, это также приводит к ускоренному растворению оксида алюминия в этой области.

Кипение свинцового слоя подтверждается наличием в камере УПР и на поверхности ловушки расплава частиц материала диаметром от 1 мм до 10 мм после эксперимента, определенного как свинец в результате рентгеноструктурного фазового анализа.

Наличие ускоренного растворения оксида алюминию в области под свинцом подтверждает диаметральный разрез модели подреакторной ловушки расплава после эксперимента, который показал максимальную эрозию со стороны наличия слоя свинца.

Таким образом, основываясь на полученных результатах и выявленных особенностей взаимодействия оксида алюминия со свинцовым слоем и кориума был сделан вывод о перспективности применения предложенного жертвенного материала на практике.

5.4 Выводы к главе 5

1. Установлено, что наличие свинца увеличивает интенсивность эрозии оксидной компоненты ЖМ. Так, глубина эрозии боковой стенки оказалась максимальной со стороны, содержащей свинец, при этом со стороны ловушки без свинцового слоя эрозия боковой стенки оказалась минимальной;
2. В результате разрушения структуры оксидной части ЖМ происходило его активное внедрение в состав кориума. Было замечено, что слой затвердевшего расплава кориума вблизи границы контакта с керамическим материалом имеет плотную однородную структуру, отличающуюся от структуры кориума в остальной части сечения, которая характеризуется пористостью и наличием округлых металлических включений;
3. Обнаружено, что граница контакта структур керамического материала с кориумом характеризуется резким изменением химического состава. Вблизи этой границы со стороны керамического материала имеется слой материала толщиной около 1,5 мм с переходной структурой на основе керамического материала в кристаллической фазе корунда (α-Al_2O_3) Структура образована зернами и скоплениями зерен корунда, окруженными скоплениями фазы вида CaO $(Al_2O_3)_6$ и фазы вида $(U,Zr,\ldots)O_2\pm x$ на основе тетрагональной кристаллической решетки;
4. По результатам исследования установлено, что характеристики микротвердости жертвенного материала имеют тенденцию к уменьшению с приближением к границе эрозии, однако вновь возрастают до практически исходного уровня на самой границе;
5. Установлено, что микроструктура затвердевшего кориума в различных областях после взаимодействия с жертвенным материалом представлена фазой типа $(U,Zr,\ldots)O_2\pm x$ с различными типами кристаллической решетки. На участках «темного» плотного кориума и переходной области взаимодействия кориума с керамическим материалом фаза твердого раствора кориума кристаллизовалась в тетрагональной модификации кристаллической решетки пространственной группы P 42/nmc, в то время как на участке «светлого» пористого кориума при том же составе фаза находится в кубической модификации кристаллической решетки пространственной группы Fm3m;

6. Обнаружено, что взаимодействие изучаемого жертвенного материала с кориумом приводит к окислению металлического циркония в составе кориума;

7. Результаты проведенного эксперимента показывают, что свинцовый слой уменьшает интенсивность роста температуры кориума, и в то же время, увеличивает скорость эрозии керамической части ЖМ. Эти обстоятельства позволяют сделать вывод о перспективности применения оксида алюминия со свинцовым слоем на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Таким образом, в процессе решения поставленных задач диссертационной работы был выполнен комплекс расчетно-аналитических, экспериментальных и материаловедческих исследований экспериментального моделирования взаимодействия кориума с жертвенным материалом на основе оксида алюминия с кипящим свинцовым слоем в условиях моделирования тяжелой аварии легководного ядерного реактора. В связи с этим, на основе полученных данных были сделаны следующие основные выводы:

1. Одним из способов по управлению конечной стадией тяжелой аварией с расплавлением активной зоны при выходе расплава за пределы корпуса реактора может быть применена концепция удержания и охлаждения кориума, которая отражается в сооружении устройств локализации расплава (УЛР) или просто ловушек расплава с целью предотвращения повреждения герметичной оболочки контейнмента.

Ловушка расплава обеспечивает прием, удержание и охлаждение кориума. В ловушках расплава используются жертвенные материалы, предназначенные для снижения температуры поступившего в ловушку высокотемпературного расплава кориума и уменьшения его плотности для осуществления гравитационной инверсии металлической и оксидной части кориума с целью уменьшения выделения взрывоопасного водорода в ходе паро-металлических реакций.

2. Для экспериментального моделирования взаимодействия расплава прототипа кориума с кандидатным жертвенным материалом из оксида алюминия и свинцовым слоем ловушки расплава реактора использована установка « Лава-Б».

Результаты проведенных расчетов показали, что при равном количестве тепла, которую нагреватели передают в расплав кориума, индукционный нагрев более эффективен с точки зрения его использования как метода имитации остаточного энерговыделения. Таким образом, при экспериментальном моделировании взаимодействия расплава прототипа кориума с кандидатным жертвенным материалом из оксида алюминия и свинцовым слоем в качестве метода имитации остаточного энерговыделения на установке «Лава-Б» следует рассматривать индукционный способ нагрева.

Разработанная и апробированная методика калибровки индукционного нагревателя, показала, что величина удельного энерговыделения в графитовом блоке составляет 2,02 кВт/кг при выбранных параметрах нагревательной системы, что соответствует минимальному значению вложенной мощности (0,41 кВт/кг) в расплав прототипа кориума и близка к значениям реального энерговыделения в аварийном реакторе для максимального приближения процесса имитации остаточного энерговыделения к реальному.

3. Результаты эксперимента по изучению возможности формирования бассейна кориума индукционным способом нагрева в ловушке расплава установки «Лава-Б» показали, что в процессе индукционного нагрева шихты в

ловушке его металлические компоненты перешли в жидкое состояние, сформировав при этом бассейн расплава. Эти процессы подтверждаются как анализом графика изменения температур в эксперименте, так и визуальным способом. Однако не все компоненты, формирующие кориум в бетонной ловушке, были расплавлены полностью. Это можно объяснить потерями тепла на излучение в среду УПР, а также тепловым взаимодействием со стенками ловушки, которые существенно холодней расплава. Высокий градиент температуры между стенками ловушки и кориумом приводит к возникновению термических напряжений, которые разрушают ловушку. Подводя итоги проведенных исследований метода получения кориума и его удержания в ловушке расплава УПР установки «Лава-Б», можно сформулировать нижеследующие предложения для его реализации:

- применять меры по снижению потерь тепла излучением с поверхности шихты/кориума в экспериментальным устройстве;
- для увеличения объема жидкой фазы кориума провести дополнительные исследования с варьированием конфигурации загрузки материалов и диаграммы питания индукционного нагревателя;
- усилить конструкцию экспериментального устройства с целью повышения его конструкционной стойкости к высоким термическим напряжениям, и как следствие, сохранения целостности в процессе экспериментальных исследований.

4. Проведенное компьютерное моделирование для оценки выбранного материала при его использовании в ловушке расплава показало, что благодаря теплотводу от кориума 0,45 МВт на совершение фазовых переходов свинца происходит снижение темпа роста средней температуры кориума за счет остаточного энерговыделения. При этом, взаимодействие свинец-жертвенный материал приводит к увеличению интенсивности теплообменных процессов по сравнению с взаимодействием кориум-жертвенный материал. Данный факт приводит к ускорению разрушения жертвенного материала и его дальнейшему растворению в кориуме для успешного завершения гравитационной инверсии.

5. Эксперимент по взаимодействию кориума с жертвенным материалом в целом подтвердил эффективность предложного способа и продемонстрировал, что:

- в процессе взаимодействия происходит плавление и последующее кипение свинцового слоя, подтвержденное показаниями термопар и наличием свинца в камере УПР и на поверхности ловушки. При этом, при достижении температуры кипения свинца происходит замедление темпа роста температуры керамического материала в некотором интервале времени;
- наличие свинцовой компоненты увеличивает интенсивность эрозии оксидной компоненты ЖМ. Со стороны ловушки без свинцового слоя эрозия боковой стенки оказалась минимальной, а со стороны, содержащей свинец глубина эрозии боковой стенки оказалась максимальной. В результате разрушения структуры оксидной части ЖМ происходило его активное внедрение в состав кориума. Слой затвердевшего расплава кориума вблизи

границы контакта с керамическим материалом имеет плотную однородную структуру, а в остальной части сечения имеет пористую структуру с наличием округлых металлических включений.

6. Структурно – фазовое состояние модельного кориума в результате высокотемпературного взаимодействия в условиях моделирования тяжелой аварии имеет некоторые особенности:

- микроструктура затвердевшего кориума в различных областях после взаимодействия с жертвенным материалом представлена фазой типа $(U,Zr,\ldots)O_2\pm x$ с различными типами кристаллической решетки. На участках темного плотного кориума и переходной области взаимодействия кориума с керамическим материалом фаза твердого раствора кориума кристаллизовалась в тетрагональной модификации кристаллической решетки пространственной группы P 42/nmc, в то время как на участке светлого пористого кориума при том же составе фаза находится в кубической модификации кристаллической решетки пространственной группы Fm3m;
- взаимодействие жертвенного материала с кориумом приводит к окислению металлического циркония в составе кориума. Такой вывод был сделан на основании полученных результатов, в которых было установлено близкое соотношение состава твердых растворов исходному соотношению урана и циркония в шихте модельного кориума.

Таким образом, результаты проведенного эксперимента показывают, что свинцовый слой уменьшает интенсивность роста температуры кориума, и в то же время, увеличивает скорость эрозии керамической части жертвенного материала. Эти обстоятельства позволяют сделать вывод о перспективности применения оксида алюминия со свинцовым слоем на практике.

Основные результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, не противоречат положениям и принципам физики конденсированного состояния и технической физики.

Оценка полноты решения поставленных задач

В процессе выполнения диссертационного исследования поставленные цели и задачи были достигнуты и полностью решены. Проведен анализ процессов, происходящих при взаимодействии кориума с жертвенными материалами, а также, разработана и апробирована методика повышения эффективности индукционной системы установки «Лава-Б» для имитации остаточного энерговыделения в кориуме. Проведено экспериментального моделирования взаимодействия кориума с жертвенным материалом из оксида алюминия и кипящим свинцовым слоем в условиях моделирования тяжелой аварии на установке «Лава-Б». Определено структурно – фазовое состояние материала после взаимодействия кориума с жертвенным материалом в условиях моделирования тяжелой аварии.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Разработанная методика повышения эффективности индукционной системы может быть применена в любых технологических установках,

использующих индукционный нагреватель, для повышения эффективности его использования.

Полученные экспериментальные данные исследований взаимодействия кориума с жертвенным материалом из оксида алюминия (Al_2O_3) со свинцовым слоем в условиях моделирования тяжелой аварии с расплавлением активной зоны могут быть использованы для разработки нового класса жертвенных материалов ловушек расплава с целью повышения надежности пассивных систем безопасности АЭС.

Оценка научного уровня диссертационной работы

Высокий научно-технический уровень результатов диссертационной работы обеспечивается применением хорошо апробированных методов компьютерного и экспериментального моделирования, методов исследования структуры и состава материалов в специализированных лабораториях Филиала «ИАЭ» РГП НЯЦ РК.

Результаты диссертационной работы были опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящим в международные базы данных Scopus и Web of Science, а также входящих в перечень рекомендованных КОКСНВО МНВО РК для опубликования результатов научной деятельности. Апробация полученных результатов осуществлялась участием автора в различных научных конференциях и семинарах.

В заключении автор выражает благодарность:

- Отечественным научным консультантам Лауреатам Государственной премии в области науки и техники имени аль-Фараби д.ф.-м.н., профессору Скакову М.К. и PhD Бакланову В.В., зарубежному научному консультанту д.т.н., профессору Градобоеву А.В. за помощь в постановке цели и задач диссертационной работы, а также за содействия и значимые замечания, ценные консультации и важнейшие советы при проведении исследований и оформлении работы;

- Коллективу отделов внереакторных испытаний и материаловедческих испытаний филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, особенно Кукушкину И.М. и Толеубекову К.О. за помощь в организации и непосредственном участии в проведении методических, экспериментальных и материаловедческих исследований на всех этапах выполнения диссертационной работы;

- Кафедре «Техническая физика и теплоэнергетика» НАО «Университет имени Шакарима города Семей» за постоянную поддержку и помощь на протяжении трех лет обучения в докторантуре.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Международное агентство по атомной энергии. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. Издание 2007 года, МАГАТЭ, Вена, - 2007.
2. Международное агентство по атомной энергии. Детерминистический анализ безопасности атомных электростанций. Специальное руководство МАГАТЭ по безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № SSG-2. МАГАТЭ, Вена, - 2004.
3. Международное агентство по атомной энергии. Пределы и условия для эксплуатации и эксплуатационные процедуры для атомных электростанций. Руководство по безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № NS-G-2.2. МАГАТЭ, Вена, - 2004.
4. Международное агентство по атомной энергии. Аспекты радиационной защиты при проектировании атомных электростанций. Нормы МАГАТЭ по безопасности. Руководство по безопасности, № NS-G-1.13. МАГАТЭ, Вена, - 2008.
5. International Atomic Energy Agency, Safety of nuclear power plants: design, IAEA Safety Standards, Specific Safety Requirements No SSR-2/1 (Rev. 1), Vienna, - 2016.
6. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.
7. Бакланов В.В.: Взаимодействие кориума с корпусом водо-водяного энергетического реактора при тяжелой аварии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, Томск, - 2017, - с. 23.
8. Международная шкала ядерных событий (INES), Тема: аварии на АЭС - часть 1.
9. Васильев А.Д., Моделирование тяжелых аварий на АЭС / учебное пособие, МФТИ, - 2012, - с. 196.
10. Скалозубов, В.И. Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР: монография / Ин-т пробл. безопасности АЭС НАН Украины. - Чернобыль, -2010.
11. Sehgal B.R. Nuclear safety in light water reactors: severe accident phenomenology / Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press, - 2012. - p.714.
12. Будаев М.А., Васильев А.Д., Звонарев Ю.А. и др. Генерация водорода при осушении бассейна выдержки во время аварии с полным обесточиванием на АЭС [Электронный ресурс] // Материалы 8-й международной научно-технической конференции “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, 28-31 мая 2013, Подольск, РФ. - Подольск: ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, - 2013.
13. Хизбуллин А.М., Камнев М.А., Тюриков О.В. Расчетное моделирование развития тяжелой аварии с учетом влияния рекомбинатора на

стратификацию водорода в защитной оболочке [Электронный ресурс] // Материалы 8-й международной научнотехнической конференции “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, 28–31 мая 2013, Подольск, РФ. - Подольск: ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, - 2013.

14. Скалозубов В.И., Ключников А.А., Ващенко В.Н., Яровой С.С. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах: монография / НАН Украины, Ин-т пробл. безопасности АЭС. - Чернобыль: Ин-т пробл. безопасности АЭС, - 2012.

15. Носовский А.В., Васильченко В.Н., Ключников А.А., Пристер Б.С. Авария на Чернобыльской АЭС: Опыт преодоления. Извлеченные уроки. / Под ред. А.В. Носовского. – К.: Техника, - 2006.

16. Hofmann P., Hagen S., Schanz G., Skokan A., «Chemical interactions of reactor core materials up to very high temperatures» / KfK 4485, - 1989. - p. 47.

17. Сидоров И.А. Устройство локализации расплава для АЭС с ВВЭР-1200 // 7-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «Гидропресс», Подольск, - 17-20 мая 2011.

18. Sehgal B.R. et al. Melt-Structure-Water Interactions During Severe Accident in LWRs // NPSD, Royal Institute of Technology, Annual Report, Sweden, - Nov. 2000.

19. Столяревский А. Спасает ли ловушка? / ПРОАТОМ, - 2014.

20. Сидоров И.А. Устройство локализации расплава для АЭС с ВВЭР-1200 // 7-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, - 2011, - с. 13.

21. Кухтевич И.В., Безлепкин В.В., Хабенский В.Б. и др. Концепция локализации расплава кориума на внекорпусной стадии запроектной аварии АЭС с ВВЭР-1000 // Отрасл. конф. «Вопросы безопасности АЭС с ВВЭР», СПб., - 2000, - т. 1, - с. 23-36.

22. Сидоров А.С., Недорезов А.Б., Рогов М.Ф. и др. Устройство локализации расплава Тяньваньской АЭС с ВВЭР-1000 / Теплоэнергетика, - 2001, - №9, - с. 8-13.

23. Гусаров В.В, Альмяшев В.И., Бешта С.В. и др. Жертвенные материалы системы безопасности атомных электростанций - новый класс функциональных материалов / Теплоэнергетика, - 2001. - № 9, - с. 22-24.

24. Gusarov V.V., Almjashev V.I., Bechta S.V., Khabensky V.B. // 6th Int. Workshop High-temperature superconductors and novel inorg. mater. engineering. Moscow, MSU, - 2001, - p. 11-32.

25. Almjashev V.I., Gusarov V.V., Bechta S.V. et.al. // 6th Int. Conf. on Intermolec. Interact. in Matter, Gdansk-Jelitkowo, - 2001, - p. 1.

26. Патент РФ RU 2169953 C2. Ловушка расплава активной зоны ядерного реактора / Акопов Ф.А., Кухаркин Н.Е., Минеев В.Н. и др. - 2001.

27. Патент RU 2696612 C1. Устройство локализации расплава / Сидоров А.С., Сидорова Н.В., Дзбановская Т.Я. - 2019.

28. Патент RU 2192053 C1. Оксидный материал ловушки расплава активной зоны ядерного реактора / Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Столярова В.Л. и др. - 2002.

29. Патент RU 100327 U1. Устройство локализации расплава / Безлепкин В.В, Сидоров В.Г., Кухтевич В.О. и др. - 2010.

30. Patent US20120300893A1. Core catcher / Kurita T., Tahara M., Komuro M., Kataguri N., Masashi T. - 2012.

31. PCT patent WO 02/080188. Oxide material for a molten-core catcher of a nuclear reactor / Gusarov V.V., Khabensky V.B., Bechta S.V. et.al. - Nov. 21 2002.

32. Патент RU 2666901. Жертвенный материал для ловушки расплава ядерного реактора / Сидоров А.С., Федоров Н.Ф., Удалов Ю.П. и др. - 2018.

33. Патент RU 2264996 C2. Жертвенный керамический материал для ловушки расплава активной зоны ядерного реактора (варианты) / Удалов Ю.П., Федоров Н.Ф., Сидоров А.С. и др. - 2005.

34. Патент RU 2675158 C1. Смесь для получения керамического жертвенного материала и способ получения керамического жертвенного материала / Сорокин А.В., Сидоров А.С., Федоров Н.Ф., Удалов Ю.П. - 2018.

35. Патент RU 2517436 C2. Способ изготовления керамического материала для устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактора / Асмолов В.Г., Загрязкин В.Н., Лагуткин А.М. и др. - 2014.

36. Патент RU 211185 U1. Устройство локализации расплава с защитным покрытием / Фиськов А.А., Шкрыгунова Е.В., Митрюхин А.Г., Магола И.А. - 2022.

37. Удалов Ю.П., Федоров Н.Ф., Лавров Б.А. и др. Функциональные материалы для пассивного управления запроектной аварией ядерного реактора на внекорпусной стадии локализации расплава активной зоны. Часть 1 / Известия СПбГТИ (ТУ), - 2010, - №8(34), - с. 17-24.

38. Альмяшев В.И., Витоль С.А., Крушинов Е.В Опыт комплексного физико-химического анализа кориумных систем // Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике. Тезисы докладов Восьмой межотраслевой научно-технической конференции (Атомэнергоаналитика - 2017). - 30 мая-1 июня 2017 г., г. Сосновый Бор: Изд-во ВВМ, 2017. - 211 с

39. Kuhtevich I.V., Bechta S.V., Asmolov V.G. et al. Core Catcher for Tianwan NPP with VVER-1000 reactor. Concept, Design and Justification // 11th International Conference on Nuclear Engineering Tokyo, JAPAN, - April 20-23 2003 ICONE11.

40. Патент РФ № 2576517. Система локализации и охлаждения расплава активной зоны ядерного реактора водо-водяного типа / Недорезов А.Б. - 2016.

41. Almjashev V.I., Gusarov V.V., Bechta S.V., Khabensky V.B., Saenko I.V. Sacrificial Materials of the Core Catcher as a New Class of Functional Materials // GdanskJelitkowo. 10-13 September 2001. Abstract Book, - 2001, - p. 1.

42. Боровков А.И., Грановский В.С., Ковтунова С.В. и др. Температурное и напряженно-деформированное состояния водоохлаждаемых элементов устройства локализации расплава кориума / Теплоэнергетика, - 2001, - № 9, - с. 14-18.

43. Asmolov V.G., Bechta S.V., Berkovich V.M. et al. VVER-1000 Reactor Core Melt Catcher of Cold Crucible Type // Proc. of Int. Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 05), Seoul, Korea. - May 15-19 2005. - p.5238.

44. Асмолов В.Г. и др. Выбор буферного материала ловушки для удержания расплава активной зоны ВВЭР-1000 / Атомная энергия. - 2002. - Т. 92. - Вып. 1. - с.7-18

45. Асмолов В.Г., Дегалычев Ю.Г, Исаев И.Ф., Киселев Н.П., Ковалев А.М., Стрижов В.Ф., Уткин Ю.М., Цуриков Д.Ф., Шах О.Я. Исследование процессов взаимодействия в корпусе реактора типа ВВЭР-1000 при тяжелой аварии. Взаимодействие металлических расплавов с засыпкой твердых частиц кориума / Курчатовский институт. Москва, - 2007, - с. 38.

46. Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Хабенский В.Б. и др. Физико-химическое моделирование и анализ процессов взаимодействия расплава активной зоны ядерного реактора с жертвенным материалом / Физика и химия стекла. - 2005. - Т. 31, - № 1. - с. 71-90.

47. Столяревский А.Я. Проблема удержания расплава топлива в защитной оболочке АЭС с ВВЭР / Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). - 2014; - (6), - с. 25-35.

48. Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Хабенский В.Б., Бешта С.В., Грановский В.С. Новый класс функциональных материалов для устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактора / Рос. хим. ж. - 2005. - № 4. - с. 42–53.

49. Khabensky V.B., Granovsky V.S., Bechta S.V., Gusarov V.V. Severe accident management concept of the VVER-1000 and the justification of corium retention in a crucible-type core catcher / Nucl. Eng. Technol. - 2009. - V.41, - Iss.5. - pp. 561–574.

50. Патент РФ № RU 2605693 C1. Оксидный материал ловушки расплава активной зоны ядерного реактора / Комлев А. А., Альмяшев В.И., Бешта С.В. - 2016.

51. Levy S. Heat transfer during molten corium-concrete interactions. S. Levy / Nucl. Eng. Des. - 1994. - V.151. - pp. 235–246.

52. Komlev A.A., Almjashev V.I., Bechta S.V., et al. New Sacrificial Material for Ex-Vessel Core Catcher / Journal of Nuclear Materials. - 2015. - № 467. - pp. 778–784.

53. Хабенский В.Б., Альмяшев В.И., Сулацкий А.А. и др. Взаимодействие металлического расплава, содержащего цирконий и уран, с бетонным жертвенным материалом / Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, - № 3 (13), - 2018.

54. Бешта С.В., Грановский В.С., Хабенский В.Б. и др. Взаимодействие оксидного жертвенного материала устройства локализации с

расплавом кориума при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР. Часть 3. Взаимодействие с металлической составляющей расплава кориума // Труды 5-й Российской национальной конференции по теплообмену. 25-29 октября 2010, Москва. - Т.1. - с. 173–176.

55. Kim H.Y. et al. Corium melt researches at VESTA test facility / Nuclear Engineering and Technology. - 2017. - V.49. - pp. 1547–1554.

56. Комлев А.А., Альмяшев В.И., Бешта С.В. и др. Жертвенный материал для ловушки расплава на основе высокоглиноземистого цемента и керамического наполнителя / Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, - 2019, - №2(16), - с.52-70.

57. Pat. ZL 02807589.7 China. Oxide material for a molten-core catcher of a nuclear reactor / Gusarov V.V., Khabensky V.B., Bechta S.V., Granovsky V.S., Almjashev V.I., Krushinov E.V., Vitol S.A., Sergeev E.D., Petrov V.V., Tikhomirov V.A., Bezlepkin V.V., Kukhtevich I.V., Aniskevich Yu.N., Sayenko I.V., Stolyarova V.L., Migal V.P., Mozherin V.A., Sakulin V.Ya., Novikov A.N., Salagina G.N., Shtern E.A., Asmolov V.G., Abalin S.S., Degaltzev Yu.G., Zagryazkin V.N. Priority Apr. 4, 2001. Patented Mar. 8, 2006

58. Tyrpekl V., Vácha P., Černý Z. et al. (2021) Development of geopolymer based sacrificial materials for GEN IV severe accident mitigation / Journal of Nuclear Materials. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153024.

59. Munot S.S., Kulkarni P.P., Nayak A.K. (2019). Experimental Investigation of Melt Coolability and Ablation Behavior of Oxidic Sacrificial Material at Prototypic Conditions in Scaled Down Core Catcher / ASME Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science. https://doi.org/10.1115/1.4043106.

60. Пат. РФ № 2586224. Однофазный керамический оксидный материал для устройства локализации расплава активной зоны / Комлев А.А., Гусаров В.В., Бешта С.В., Альмяшев В.И., Хабенский В.Б. Приоритет от 28.01.2015. Дата публикации - 10.06.2016.

61. Пат. РФ № 2551375. Фиксирующий оксидный материал для пластин жертвенного материала устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактора / Можжерин В.А., Сакулин В.Я., Мигаль В.П., Новиков А.Н., Салагина Г.Н., Штерн Е.А., Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Комлев А.А., Хабенский В.Б., Грановский В.С., Крушинов Е.В. Дата публикации - 21.04.2015.

62. Пат. РФ № 2559294. Шихта и оксидный жертвенный материал для устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактора / Можжерин В.А., Сакулин В.Я., Мигаль В.П., Новиков А.Н., Салагина Г.Н., Штерн Е.А., Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Комлев А.А., Хабенский В.Б., Грановский В.С., Крушинов Е.В. Дата публикации - 14.07.2015.

63. Хабенский В.Б., Грановский В.С., Альмяшев В.И., Витоль С.А., Крушинов Е.В., Котова С.Ю., Сулацкий А.А., Мигров Ю.А., Гусаров В.В., Бешта С.В. Влияние термоградиентных условий на физико-химическое взаимодействие расплава субокисленного кориума и корпусной стали при удержании расплава в корпусе реактора / Технология обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. - 2018. - № 2 (12). - с.42–65.

64. Khabensky V.B., Granovsky V.S., Almjashev V.I., Vitol S.A., Krushinov E.V., Kotova S.Ju., Sulatsky A.A., Gusarov V.V., Bechta S.V., Barrachin M., Bottomley D., Fischer M., Hellmann S., Piluso P., Miassoedov A., Tromm W. Effect of temperature gradient on chemical element partitioning in corium pool during in-vessel retention / Nucl. Eng. Des. - 2018. - V. 327. - pp. 82–91.

65. Альмяшев В.И., Грановский В.С., Хабенский В.Б., Крушинов Е.В., Сулацкий А.А., Витоль С.А., Гусаров В.В., Бешта С.В. Экспериментальное исследование процессов окисления расплава кориума в корпусе реактора / Технология обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. - 2017. - № 4 (10). - с.59–84.

66. Хабенский В.Б., Альмяшев В.И., Витоль С.А., Крушинов Е.В., Сулацкий А.А., Котова С.Ю., Комлев А.А., Гусаров В.В. Исследование физико-химических, теплофизических и механических характеристик серпентинитового бетона шахты реактора АЭС и процессов его взаимодействия с расплавом кориума / Технология обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. - 2017. - № 1 (7). - с. 56–74.

67. Альмяшев В.И., Бешта С.В., Витоль С.А., Гусаров В.В., Крушинов Е.В., Лопух Д.Б., Мартынов А.П., Хабенский В.Б. Экспериментальное исследование и термодинамический анализ фазовых равновесий в системах ZrO2 -FeO и UO2 -FeO / Технология обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. - 2016. - № 4 (6). - с.59–74.

68. Journeau C. Contribution des essais en matériaux prototypiques sur la plate-forme PLINIUS à l'étude des accidents graves de réacteurs nucléaires. Sciences de l'ingénieur [physics] // Université d'Orléans. - 2008. - pp. 229.

69. Бекмулдин М.К., Гановичев Д.А., Акаев А.С. Исследование теплоизоляционных свойств корпуса приема расплава экспериментальной установки ЛАВА-Б / Вестник НЯЦ РК. - выпуск 1. - 2019. - с. 66-71.

70. Батырбеков Э.Г., Скаков М.К. Институту Атомной Энергии Национального Ядерного Центра Республики Казахстан – 60 лет / Институт атомной энергии НЯЦ РК, - 2018. - с. 139-141.

71. Gražulis S.; Chateigner D., Downs R.T., Yokochi A.F., Quirós M., Lutterotti L., Manakova E., Butkus J., Moeck P., Le Bail A. Crystallography Open Database - an open-access collection of crystal structures / J. Appl. Cryst., - 2009, - 42, - с. 726-729.

72. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справ. пособие / М.: Машиностроение-1, - 2004. – 512 с.

73. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / М.: Мир, - 1979. – 392 с.

74. Оголихин Д.А. Метод конечных элементов / ЛитРес: Самиздат, - 2018. – 100 с.

75. Денисов М.А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование: учебное пособие / Екатеринбург: УрФУ, - 2011. - 149 с. ISBN 978-5-321-02043-2.

76. Сидоренко В.А. Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР / М.: Атомиздат, 1977. - 216 с. - (Проблемы ядерной энергетики). - 3000 экз.

77. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции / 5-е. - М.: ИздАТ, - 1994. - с. 289.

78. Broughton J.M. A scenario of the TMI-2 accident / Nuclear Technology. - 1989. - V. 87. - pp. 34-53.

79. Андрушечко С.А., Афоров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / М.: Логос, - 2010. - с. 604.

80. Kurita T., Sakaki I., Sasaki F. et al. Test and evaluation plan for passive debris cooling system // ICNRP – 2013, 9th International Conference NUCLEAR AND RADIATION PHYSICS, Almaty, Kazakhstan, - September 24-27 2013, - pp. 19 – 29.

81. Kawano S., Hayashi T., Morishima Ya. et al. Characterization of fuel debris by large-scale simulated debris examination for Fukushima daiichi nuclear power station // Proceedings of ICAP 2017, Fukui and Kyoto (Japan), - April 24-28 2017. - pp. 1105 - 1110.

82. Акаев А., Бекмулдин М. Проект CORMIT. Обеспечение безопасной эксплуатации ядерных реакторов / Человек. Энергия. Атом. - №1 (41) 2024. - с. 42-47.

83. Baklanov V., Zhdanov V. et al. Experiments to justify structure of residual heat simulation assembly under INVECOR project / Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. - 2009. - Vol. 1, - pp. 66 – 76. [In Russian].

84. Zhdanov V. COTELS Project (1): Overview of Project to study FCI and MCCI during a Severe Accident // OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability. Karlsruhe, Germany. - 15-18 November 1999.

85. ANSYS Fluent Tutorial Guide, - 2016

86. Zhdanov V., Baklanov V., Bottomley P.W.D., Miassoedov A., Tromm T.W., Journeau Ch., Altstadt E., Clement B., Oriolo F. Study of the processes of corium-melt retention in the reactor pressure vessel (INVECOR) // Proceedings of ICAPP 2011. Nice, France. 2-5 May 2011. - pp.1300 – 1308.

87. Иванова Л.И., Гробова Л.С., Сокунов Б.А., Сарапулов С.Ф. Индукционные тигельные печи: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. // Екатеринбург: Изд-во УГТУ - УПИ, - 2002. - с. 87.

88. Толеубеков К.О., Хажидинов А.С., Акаев А.С. Моделирование индукционного нагрева при имитации остаточного энерговыделения в кориуме при взаимодействии с жаропрочными материалами / Вестник НЯЦ РК. - 2021;(1):9-14. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-1-9-14

89. Рамазанова К.М., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Хажидинов А.С., Акаев А. С. Расчет температурного поля кориума и огнеупорных блоков ловушки расплава установки «Лава-Б» / Вестник НЯЦ РК. - Вып. 3, - 2016. - с. 134 – 139.

90. Асмолов В.Г., Загрязкин В.Н., Астахова Е.В., Вишневский В.Ю., Дьяков Е.К., Котов А.Ю., Репников В.М. Плотность UO2–ZrO2-расплавов / ТВТ, - 2003, - том 41, - выпуск 5, - с. 714–719.

91. Позняк И.В., Шатунов А.Н., Печенков А.Ю. Измерение электропроводности расплава кориума / Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2008. - Вып.10.- с. 39-45.

92. ICTS project #K-1265 INVECOR (IN-VEssel Corium Retention in accident of water reactor) / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://istc.int/ru/project/DA8802253C138C29C3257052005303CF

93. Бакланов В.В., Жданов В.С., Малышева Е.В. Экспериментальное исследование процессов при удержании расплава кориума в корпусе реактора (INVECOR) / Вестник НЯЦ РК, - вып. 1, - 2009, - с. 55-65.

94. Чиркин В.С., «Теплофизические свойства материалов ядерной техники» // М.: АТОМИЗДАТ. - 1968, - с. 484.

95. Жуков М.Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) // М.: Наука, - 1973. - с. 232.

96. Toleubekov K.O., Baklanov V.V., Akayev A.S., Bekmuldin M.K. Modeling the process of decay heat imitation in the corium at the «Lava-B» facility / «ВЕСТНИК КАЗНУ. Серия физическая (ВКФ)», - №2 (81). 2022. - pp. 97-106. doi.org/10.26577/RCPh.2022.v81.i2.012

97. Толеубеков К.О., Акаев А.С., Бекмулдин М.К. Повышение эффективности системы индукционного нагрева для имитации остаточного энерговыделения в кориуме при взаимодействии с жаропрочными материалами / Вестник НЯЦ РК. - 2020;(4):47-52.

98. Толеубеков К.О., Хажидинов А.С., Акаев А.С. Моделирование индукционного нагрева при имитации остаточного энерговыделения в кориуме при взаимодействии с жаропрочными материалами / Вестник НЯЦ РК. - 2021;(1):9-14 https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-1-9-14

99. Bekmuldin M., Skakov M., Baklanov V. et al. Experimental simulation of decay heat of corium at the Lava-B test-bench / Nuclear Technology 210. - 2023. - p.46-54. https://doi.org/10.1080/00295450.2023.2226539

100. Бекмулдин М.К., Скаков М.К., Градобоев А.В. Экспериментальное моделирование остаточного энерговыделения кориума на установке «Лава-Б» // Сборник тезисов XI Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине». Томск. 7-9 сентября 2022. - с. 113 - 114.

101. ГОСТ 25941-83. Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия / Москва: Изд-во стандартов, - 2003. - с. 30.

102. Проект «Cormit-II» / [Электронный ресурс]: https://www.nnc.kz/ru/news/show/215

103. Эксперимент RT-11 / [Электронный ресурс]: https://www.nnc.kz/news/show/250

104. ANSYS release 14.5 Documentation for ANSYS WORKBENCH: ANSYS Inc // Электрон. дан. и прогр. - [Б. м.], - 2014.

105. Maruyama Yu., Tahara M., Nagasaka H., Kolodeshnikov A., Zhdanov V., Vassiliev Yu. Recent results of MCCI studies in COTELS project //

NTHAS3. Third Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety Kyeongju. - Korea, October 13 - 16, - 2002

106. Васильев Ю.С. и др. Исследования последствий тяжелых аварий водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов по проекту COTELS / Вестник НЯЦ РК. - Вып. 1, - 2002. - с. 5 - 17.

107. Skakov M., Baklanov V., Akaev A. et al. On the possibility of forming a corium pool by induction heating in a core catcher of the Lava-B facility / Appl. Sci. - 13: 2480. 2023. https://doi.org/10.3390/app13042480

108. Sehgal B.R., Theerthan A., Giri A. et.al. Assessment of reactor vessel integrity (ARVI) / Nucl. Eng. and Des., - 2003, - Vol 221, - p. 23-53.

109. Скаков М.К., Бекмулдин М.К. Подреакторная ловушка расплава легководного ядерного реактора с жертвенным материалом из керамики с кипящим металлическим слоем // Международная научно-практическая конференция «Уалиевские чтение». - 2022. - 1 часть. - с. 355 – 361.

110. Бекмулдин М.К. Подреакторная ловушка расплава с жаростойким композитным покрытием // Ядерные технологии: от исследований к внедрению-2021. Сборник материалов научно-практической конференции. Нижний Новгород, 16 апреля 2021, - с. 21-23.

111. Bekmuldin M.K., Skakov M.K., Baklanov V.V., Gradoboyev A.V. Heat-resistant composite coating of the under-reactor melt trap // International Conference «Advanced manufacturing materials and research: new technologies and techniques AMM&R2021», Abstracts, Ust-Kamenogorsk, February 19 2021, - p. 63.

112. Skakov M.K., Bekmuldin M.K. Investigation of the possibility of using heat-resistant ceramics with a fluidized bed for the under-reactor melt trap // III International Scientific Forum «Nuclear Science and Technologies», Abstracts, September 20-24 2021 Almaty, - p. 146-147.

113. Бекмулдин М.К., Акаев А.С., Толеубеков К.О. Исследование возможности использования композитного покрытия жаростойкого материала подреакторной ловушки // IX International conference «Semipalatinsk test site: Legacy and Prospects for Scientific-Technical Potential Development», Abstracts, September 7-9, Kurchatov, - 2021, - p. 54-55.

114. Скаков М.К., Бекмулдин М.К. Исследование возможности использования жаропрочной керамики с кипящим слоем для подреакторной ловушки расплава // IV International Scientific Forum «Nuclear Science and Technologies», Abstracts, September 26-30, - 2022. Almaty, - p. 164.

115. Bekmuldin, M.K., Skakov, M.K., Baklanov, V.V., Gradoboyev, A.V., Akaev, A.S. Heat-resistant composite coating with a fluidized bed of the under-reactor melt trap of a light-water nuclear reactor / Eurasian Physical Technical Journal. - 2021. - Vol. 18, No. 3(37). - pp. 65-70. DOI 10.31489/2021No3/65-70

116. Патент № 7845. Способ повышения эффективности жаростойкого материала ловушки расплава активной зоны легководного ядерного реактора / Скаков М.К., Бакланов В.В., Акаев А.С., Микиша А.В., Бекмулдин М.К. бюллетень №8 от 24.02.2023 г.

117. Бекмулдин М.К., Скаков М.К., Бакланов В.В., Толеубеков К.О. Повышение эффективности локализации кориума в подреакторной ловушке расплава легководного ядерного реактора / Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. 2021;(1(1)):53-59.

118. Wan-Sik Ye., Kwang-Hyun B., Youngjo Ch., Yong Soo K., Jaegon L. CFD analysis of core melt spreading on the reactor cavity floor using ANSYS CFX code / Nuclear Engineering and design. 249 (2012) 90-96.

119. Патент РФ № 2165108. Система локализации и охлаждения кориума ядерного реактора водо-водяного типа // Хабенский В.Б., Грановский В.С., Бешта С.В. и др. опубл. 10.06.2005, бюл. № 16.

120. Kolev N.I. Multiphase Flow Dynamics 4 / Nuclear Thermal Hydraulics, Volume 4. - Springer, - 2009. - p. 501.

121. Skakov M., Baklanov V., Bekmuldin M. et al. Results of experimental simulation of interaction between corium of a nuclear reactor and sacrificial material (Al_2O_3) with a lead layer / AIMS Materials Science. - 2024, - Volume 11, - Issue 1. - pp. 81-93. doi: 10.3934/matersci.2024004

122. Bekmuldin M.K., Turkach A.A. Interaction of corium with sacrificial material of a core catcher with a lead layer in a severe accident // XX Международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук». Abstracts, Tomsk, April 25-28, - 2023, - p. 63.

123. Бекмулдин М.К., Скаков М.К., Бакланов В.В. и др. Взаимодействие кориума с керамическим материалом из оксида алюминия (Al2O3) со свинцовой прокладкой в условиях тяжелой аварии с расплавлением активной зоны // X International conference «Semipalatinsk test site: Legacy and Prospects for Scientific-Technical Potential Development», Abstracts, September 12-14, Kurchatov, - 2023, - p. 44-45.

124. Bekmuldin M., Toleubekov K., Kukushkin I. The results of experimental modeling of the processes of interaction of the corium prototype with aluminum oxide ceramics and a lead layer // International Conference «Energy Fluxes and Radiation Effects», Abstracts, Tomsk, September 16-21, - 2024, - p. 564.

125. Skakov M.K., Baklanov V.V., Kukushkin I.M., Bekmuldin M.K., Akaev A.S., Azbergenov M.N., Gradoboev A.V. The main structural-phase states of interaction between model corium of a nuclear reactor and a sacrificial material based on Al2O3 and a lead layer / International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology. - 6(2024) 43-56. https://doi.org/10.1016/j.jandt.2024.09.001

ПРИЛОЖЕНИЕ А

«УТВЕРЖДАЮ»
Первый заместитель директора
Филиала «ИАЭ» РГП НЯЦ РК
_____ В.В. Бакланов
«___» _____ 2022 г.

АКТ

о разработке и наличии «Методики экспериментальных исследований по изучению взаимодействия расплава кориума с жертвенным материалом подреакторной ловушки в условиях имитации остаточного энерговыделения в кориуме»

г. Курчатов №13-240-02/1663вн «06» 09 2022 г.

Мы нижеподписавшиеся, Акаев А.С. – начальник отдела внереакторных испытаний и работники лаборатории экспериментальной теплофизики: Бекмулдин М.К. – начальник лаборатории, Мартыненко Е.А. – начальник группы лаборатории, Туркач А.А. – инженер 2 категории лаборатории, составили акт о разработке и наличии «Методики экспериментальных исследований по изучению взаимодействия расплава кориума с жертвенным материалом подреакторной ловушки в условиях имитации остаточного энерговыделения в кориуме» (рег.№13-240-02/1662вн от 06.09.2022 г.). Методика разработана на основе анализа данных, приведенных в литературных источниках, а также на основе практического опыта, полученного при проведении экспериментальных исследований в рамках НТП «Развитие атомной энергетики в Республики Казахстан» по теме (01.01) «Исследование процессов взаимодействия расплава материалов активной зоны водо-водяного энергетического ядерного реактора с защитными материалами устройств локализации кориума при тяжелой аварии с плавлением активной зоны».

Методика предназначена для экспериментального моделирования тепловых и физико-химических процессов взаимодействия кандидатных жертвенных материалов с расплавом прототипа кориума в процессе его локализации в подреакторной ловушке, а также, получению экспериментальных данных о характере взаимодействия кандидатных жертвенных материалов подреакторной ловушки при взаимодействии с прототипом кориума в условиях, имитирующих остаточное энерговыделение в кориуме на экспериментальной установке «Лава-Б».

В методике описаны рекомендации по:

- созданию конструкции экспериментального устройства (ЭУ), используемого в экспериментах по исследованию взаимодействия расплава кориума с кандидатными материалами подреакторной ловушки расплава;
- использованию экспериментального оборудования;
- последовательности проведения экспериментальных исследований;
- анализу и обработке полученных экспериментальных данных.

Заключение: Работы по созданию методики выполнены в полном объеме и в заданные сроки.

Начальник отдела внереакторных испытаний А.С. Акаев

Начальник лаборатории экспериментальной теплофизики М.К. Бекмулдин

Начальник группы лаборатории экспериментальной теплофизики Е.А. Мартыненко

Инженер 2 кат. лаборатории экспериментальной теплофизики А.А. Туркач

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

«УТВЕРЖДАЮ»
Первый заместитель директора
Филиала «ИАЭ» РГП НЯЦ РК
_____В.В. Бакланов
«24» 04 _____2023 г.

АКТ №13-240-02/4196вн от 21.07.2023г

О разработке «Экспериментального устройства для изучения взаимодействия расплава кориума с защитным материалом подреакторной ловушки в условиях имитации остаточного энерговыделения в кориуме»

г.Курчатов «___»_____2023 г.

Мы нижеподписавшиеся, Акаев А.С. – начальник отдела внереакторных испытаний и работники лаборатории экспериментальной теплофизики: Бекмулдин М.К. – начальник лаборатории, Мартыненко Е.А. – начальник группы лаборатории, Туркач А.А. – инженер 2 категории лаборатории, составили акт о разработке «Экспериментального устройства для изучения взаимодействия расплава кориума с защитным материалом подреакторной ловушки в условиях имитации остаточного энерговыделения в кориуме». Экспериментальное устройство разработано на основе расчетно-теоретических исследований («Расчет разогрева экспериментального устройства» №13-240-03/93 от 10.06.2021 г.) и практического опыта, полученного при проведении экспериментальных исследований в рамках НТП «Развитие атомной энергетики в Республики Казахстан» по теме (01.01) «Исследование процессов взаимодействия расплава материалов активной зоны водо-водяного энергетического реактора с защитными материалами устройств локализации кориума при тяжелой аварии с плавлением активной зоны».

Экспериментальное устройство предназначено для экспериментального моделирования тепловых и физико-химических процессов взаимодействия кориума с защитными материалами подреакторной ловушки расплава в условиях имитации остаточного энерговыделения в кориуме. Конструкция экспериментального устройства разработана применительно к экспериментальной установке «Лава-Б».

Экспериментальное устройство состоит из следующих основных частей:

1. Бетонное основание (АК.214.35.00.000);
2. Цилиндр из жертвенного материала (исследуемый материал);
3. Диск из жертвенного материала (исследуемый материал);
4. Вкладыш из нержавеющей стали.

Экспериментальное устройство представляет собой бетонный стакан, в который устанавливается цилиндр и диск из исследуемого защитного материала, а также вкладыш из нержавеющей стали. Экспериментальное устройство устанавливается в устройство приема расплава (УПР) установки «Лава-Б», оснащенное индуктором для процесса имитации остаточного энерговыделения в кориуме. Во время проведения исследований в экспериментальное устройство, с установленными кандидатными защитными материалами, сливается расплав кориума (при температуре 2500 °С) и включается индуктор УПР для имитации остаточного энерговыделения в кориуме.

Заключение: Работы по разработке экспериментального устройства выполнены в полном объеме и заданные сроки.

Начальник отдела внереакторных испытаний А.С.Акаев

Начальник лаборатории экспериментальной теплофизики М.К. Бекмулдин

Начальник группы лаборатории экспериментальной теплофизики Е.А. Мартыненко

Инженер 2 кат. лаборатории экспериментальной теплофизики А.А. Туркач

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 7845

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL

(21) 2023/0063.2

(22) 08.10.2021

(45) 24.02.2023

(54) Жеңіл су ядролық реактордың белсенді аймағының балқыма тұзағының ыстыққа төзімді материалының тиімділігін арттыру тәсілі
Способ повышения эффективности жаростойкого материала ловушки расплава активной зоны легководного ядерного реактора
Method of increasing the efficiency of a heat-resistant material of a core catcher of a light-water nuclear reactor

(73) Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» шаруашылық жүргізу құқығындағы республикалық мемлекеттік кәсіпорны (KZ)
Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» Министерства энергетики Республики Казахстан (KZ)
«National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan» Republican State Enterprise on the Right of Economic Management of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan (KZ)

(72)

Скаков Мажын Канапинович (KZ)	Skakov Mazhyn Kanapinovich (KZ)
Бакланов Виктор Владимирович (KZ)	Baklanov Viktor Vladimirovich (KZ)
Акаев Асан Сабырович (KZ)	Akaev Asan Sabyrovich (KZ)
Микиша Анатолий Владимирович (KZ)	Mikisha Anatoly Vladimirovich (KZ)
Бекмулдин Максат Куатбекович (KZ)	Bekmuldin Maksat Kuatbekovich (KZ)

ЭЦҚ қол қойылды — Е. Оспанов
Подписано ЭЦП — Е. Оспанов
Signed with EDS — Y. Ospanov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of RSE «National institute of intellectual property»