АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (Phd) по образовательной программе 8D05302 – «Техническая физика»

Бекмулдина Максата Куатбековича

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

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию взаимодействия модельного кориума легководного ядерного реактора с кандидатным жертвенным материалом – Al_2O_3 и свинцовым слоем ловушки расплава, в условиях моделирования процессов тяжелой аварии, а также исследованию структурно – фазового состояния кориума, полученного в результате проведенного высокотемпературного взаимодействия.

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.