

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 8D05302 – «Техническая физика»

Толеубекова Куанышбека Оразбековича

Взаимодействие расплава материалов активной зоны легководного ядерного реактора с металлами-охлаждителями в условиях внекорпусной стадии развития тяжелой аварии

Общая характеристика работы

В диссертационной работе представлены результаты проведенных исследований возможности использования эффекта кипения металлов для охлаждения кориума в ловушке расплава легководного реактора в случае тяжелой аварии с расплавлением активной зоны на атомной станции.

Актуальность темы исследования

История атомной энергетики показывает, что в случае потери охлаждения активной зоны реактора во время тяжелой аварии на атомной станции происходит ее расплавление с образованием расплава конструкционных материалов известного как кориум. При дальнейшем развитии аварии происходит разрушение корпуса реактора и выход кориума в подреакторное пространство.

Последствиями таких аварий может быть значительное радиоактивное загрязнение окружающей среды. В тоже время, причинами таких отклонений, которые приводят к развитию аварийной ситуации на атомной станции, могут быть не только человеческий фактор или несовершенство конструкции АЭС, но и природные катаклизмы, приводящие к отказу работоспособности различного оборудования.

Таким образом, на сегодняшний день актуальными являются не только вопросы, связанные с безопасной эксплуатацией атомных станций и предотвращением аварийных ситуаций, но и снижением последствий тяжелых аварий в случае их возникновения. В связи с этим, по мере накопления знаний о развитии тяжелых аварий, а также для исключения или существенного ослабления наиболее опасных последствий ее протекания были приняты дополнительные технические средства управления тяжелой аварией, обеспечивающие сохранение герметичности контейнмента станции.

Одним из способов управления конечной стадией тяжелой аварией с расплавлением активной зоны является концепция удержания и охлаждения кориума вне корпуса реактора в устройствах локализации расплава (УЛР) или просто ловушках расплава.

Среди известных ловушек расплава легководных ядерных реакторов наиболее технически проработан и широко используемый на практике является ловушка расплава тигельного типа реактора ВВЭР. Такая ловушка расплава устанавливается на все атомные станции с реакторами ВВЭР начиная со времени строительства Тяньваньской АЭС в Китае.

Концепция локализации кориума в ловушке расплава реактора ВВЭР заключается в разбавлении кориума жертвенными материалами, отводом тепла через водоохлаждаемый корпус ловушки и подаче воды на поверхность кориума. Разбавление кориума применяется для его охлаждения и уменьшения плотности его оксидной части, расположенной в нижней области ловушки. Это необходимо для осуществления так называемого процесса гравитационной инверсии слоев кориума с целью недопущения паро-металлических реакций, уменьшения объёмного энерговыделения в кориуме и увеличения поверхности теплообмена с корпусом ловушки. Охлаждающая вода подается на поверхность кориума после всплытия его оксидной части.

Работоспособность концепции внекорпусного удержания кориума в УЛР подтверждается на основе проведенного комплекса расчетно-экспериментальных работ, однако в настоящее время существует спрос на различные исследования, направленные на дальнейшее повышение эффективности и безопасности их эксплуатации.

Можно заметить, что при локализации кориума в ловушке расплава присутствует промежуток времени, когда охлаждение поверхности кориума не организовано. В связи с этим, для повышения эффективности локализации кориума в ловушке расплава можно организовать охлаждение его поверхности до начала поступления воды в ловушку для осуществления непрерывного теплоотвода от кориума.

Одним из наиболее перспективных способов организации такого охлаждения является использование эффекта кипения металлов. Выбор металлов, в первую очередь, обусловлен их теплофизическими свойствами. Идея основывается на использовании эффекта кипения металлов на поверхности кориума аналогично охлаждению водой. Таким образом, для понимания всех аспектов такого взаимодействия целесообразным было проведение расчетно-аналитических и экспериментальных исследований.

Целью настоящей диссертационной работы является исследование взаимодействия кориума легководного реактора с металлами-охлаждителями в условиях моделирования тяжелой аварии с расплавлением активной зоны для подтверждения возможности их использования в качестве охладителей.

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

1. Провести анализ физико-химических свойств известных металлов с последующим расчетно-аналитическим обоснованием использования эффекта кипения металлов для охлаждения поверхности кориума в ловушке расплава;
2. Разработать методику проведения экспериментов по исследованию взаимодействия металлов с кориумом в условиях моделирования процессов тяжелой аварии на стенде ВЧГ-135;
3. Установить особенности взаимодействия металлов-охлаждителей с кориумом в условиях сброса фрагментов твердого металла в расплав и влияние металлов на структурно-фазовое состояние кориума после проведения экспериментов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Тепловые расчеты эффекта кипения металлов-охладителей для организации непрерывного теплоотвода с поверхности кориума.

Моделирование показало, что при подаче металла-охладителя (цинк, сурьма и марганец) на поверхность кориума происходит их быстрое плавление за счет интенсивного теплообмена. Время полного плавления определяется значением температуры плавления конкретного металла-охладителя: цинк (~ 1,6 с), сурьма (~ 3,4 с) марганца (~ 5,5 с). При этом в процессе цинк выкипает полностью, в то время как кипение сурьмы носит частичный характер (в некоторых областях расчетной модели значения температуры сурьмы ниже температуры кипения $T_{кип} = 1908 \text{ K}$). Марганец не достигает температуры кипения, устанавливая тепловое равновесие с кориумом со средним значением температур ~ 1750 К.

2. Разработанная и апробированная методика проведения экспериментов в условиях сброса исследуемых металлов-охладителей в тигель с расплавом кориума на стенде ВЧГ-135.

Получение расплава кориума на стенде ВЧГ-135 осуществляется методом индукционного нагрева подготовленной шихты в графитовом тигле. После получения требуемой температуры кориума равной ~ 2250 °С, происходит сброс исследуемого металла-охладителя на расплав кориума из специального устройства путем открытия заслонки с помощью электромагнитного привода. Температура металла-охладителя на момент его сброса достигает ~ 400 °С.

3. Влияние металлов - охлажденных на структурно-фазовый состав кориума при высокотемпературном взаимодействии.

Взаимодействие цинка с расплавом кориума при температуре ~ 2250 °С приводит к интенсивному кипению металла-охладителя и полному испарению из тигля. Кипению сурьмы подвергается не более 20 % ее общей массы сброшенного металла, в то время как остальная часть взаимодействует с кориумом с образованием фазового состава на основе ряда твердых растворов уран-циркония типа $(\text{Zr,U})\text{O}_{2-x}$, а также небольшого количества фаз, принадлежащим α -цирконию, стабилизированному кислородом, и фазе соединения Zr-Sb-O . Марганец не достигает точки кипения и вносит изменения в состав кориума, при этом образуя большой ряд твердых растворов уран-циркониевого типа, соединений циркония-марганца и кислорода (Zr-Mn-O , Zr_2Mn , Zr_3O), а также фиксируется взаимодействие с материалом плавильного объема.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

- Впервые было предложено использовать кипение металлов для охлаждения поверхности расплава кориума для организации непрерывного теплоотвода в весь период локализации кориума в ловушке расплава. Были сформулированы требования и определены металлы, которые могут быть использованы для охлаждения кориума в ловушке расплава;

- Разработана и апробирована в серии экспериментов методика проведения испытаний материалов с низкой температурой плавления относительно температуры существования расплава кориума;

- Установлено влияние исследуемых металлов на структурно-фазовое состояние кориума в результате проведения экспериментов в условиях моделирования тяжелой аварии с расплавлением активной зоны.

Объектом исследования являются кандидатные металлы, которые могут быть использованы для охлаждения кориума в ловушке расплава.

Предметом исследования являются методические подходы к обеспечению качественного проведения экспериментов и влияние исследуемых металлов на структурно-фазовое состояние кориума в результате высокотемпературного взаимодействия в условиях моделирования тяжелой аварии.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели и задач настоящей диссертационной работы использовались различные методы исследований в том числе как физического и компьютерного моделирования, так и методов исследований структуры и состава материалов.

Использование выбранных методов основано на применении программного обеспечения ANSYS, экспериментального стенда ВЧГ-135 и парка оборудования для проведения материаловедческих исследований.

Компьютерное моделирование представляло собой ряд численных экспериментов по исследованию взаимодействия металлов с кориумом в условиях тяжелой аварии. Помимо этого, компьютерное моделирование использовалось для обоснования работоспособности разработанной методики проведения экспериментов по сбросу фрагментов металла в жидкий кориум на при моделировании тяжелой аварии на стенде ВЧГ-135.

Использование современных материаловедческих методов исследования материалов, полученных в результате физического моделирования взаимодействия металлов с кориумом, позволило провести комплексный анализ изучаемого взаимодействия и сделать соответствующие выводы.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- Разработанная методика физического моделирования обеспечивает своевременный контакт металла-охлаждителя с кориумом и позволяет провести исследование процессов, протекающих при тяжелой аварии с имитацией работы предлагаемого способа охлаждения расплава.

Предложенная в данной работе методика проведения эксперимента на высокотемпературном стенде ВЧГ-135 может найти применение для решения схожих задач на аналогичных экспериментальных установках.

- Полученные экспериментальные данные взаимодействия легкоплавких металлов с кориумом в условиях тяжелой аварии могут быть использованы специалистами в области атомной энергии при разработке систем локализации аварии перспективных реакторных установок.

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

Автор принимал непосредственное участие в формировании методических подходов к обеспечению качественного проведения исследований, проведении экспериментов на стенде ВЧГ-135 и последующих материаловедческих исследований.

Все работы проводились в тесном сотрудничестве с ведущими учеными и специалистами Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» (РГП НЯЦ РК). Анализ результатов, полученных в ходе проведения диссертационного исследования, а также формулировка основных выводов по диссертационной работе, которые обобщают результаты исследования и проведенных расчетных и экспериментальных работ, выполнены совместно с научными консультантами.

Связь темы с планами научно-исследовательских программ

Результаты, представленные в данной диссертационной работе, получены в рамках выполнения проекта грантового финансирования Комитета науки МНВО РК на тему «Разработка и исследование способа охлаждения кориума в подреакторной ловушке расплава активной зоны АЭС при тяжелой аварии» за 2022-2024 гг. (AP14870512).

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 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 положения и результаты диссертационной работы были представлены на 9 международных и отечественных научных конференциях:

1. IV Международный научный форум «Ядерная наука и технологии» (г. Алматы, Республика Казахстан, 26 — 30 сентября 2022 года);
2. Международная научно-практической конференция «Увалиевские чтения-2022. Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов» (г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 16-17 сентября 2022 года);
3. Международная научная конференция «Абдильдинские чтения: актуальные проблемы современной физики» (г. Алматы, Республика Казахстан, 12-15 Апрель 2023 года);
4. XX International Conference of students, graduate students and young scientists «Prospects of fundamental sciences development» (Tomsk, the Russian Federation, April 25–28, 2023);

5. XX Международной конференции «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (город Курчатов, Республика Казахстан, 12 - 14 сентября 2023 года);

6. International Conference “Fundamental and Applied Problems of Modern Physics” (Tashkent, the Republic of Uzbekistan, October 19-21, 2023);

7. Международная научно-практическая конференция «Современное состояние и перспективы развития атомной промышленности в Республике Казахстан» (город Алматы, Республика Казахстан, 27-28 ноября 2023 года);

8. IX International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (Tomsk, the Russian Federation, September 15-21, 2024);

9. XXIII конференция-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК (город Курчатов, Республика Казахстан, 16 - 18 октября 2024 года).

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

Публикации

По результатам изложенных в диссертации исследований опубликовано 12 печатных работ, из них в рецензируемых научных изданиях РК, рекомендованных КОКСНВО – 1, в журналах, индексируемых в базе Scopus и/или Web of Science – 3, в сборниках трудов международных конференций – 7, а также патента на полезную модель – 1.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников. Диссертация изложена на 106 страницах, содержит 53 рисунка, 12 таблиц и список использованных источников из 145 наименований.