

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности
6D072300 – «Техническая физика»

Витюк Галины Анатольевны

Исследование параметров твэлов в облучательных устройствах в импульсном графитовом реакторе

В диссертационной работе представлены результаты разработки новых методических подходов к подготовке и проведению экспериментов в импульсном графитовом реакторе ИГР, обеспечивающих повышение качества прогнозирования и реализации заданных параметров испытаний реакторных облучательных устройств для исследования процессов, сопровождающих тяжелую аварию ядерного реактора с расплавлением активной зоны.

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день в мире наблюдается высокий спрос на экспериментальное исследование поведения новых типов реакторного топлива в переходных и аварийных режимах работы. Наиболее представительные экспериментальные данные могут быть получены в условиях динамических испытаний в исследовательских реакторах. В мире существует несколько исследовательских реакторов, на которых могут проводиться динамические испытания, однако, все они обеспечивают возможность исследования сборок, состоящих лишь из нескольких тепловыделяющих элементов (твэлов).

Нейтронно-физические характеристики реактора ИГР обеспечивают возможность изучения поведения в переходных и аварийных режимах работы тепловыделяющих сборок (ТВС) различных типов реакторов, состоящих из нескольких десятков твэлов, содержащих до 8 кг диоксида урана. Разработанные и адаптированные к условиям экспериментов методики, применяемые к динамическим испытаниям, позволяют обеспечивать качественное определение параметров испытываемого топлива.

Основной задачей реализуемых в настоящее время экспериментальных программ является моделирование условий образования и обеспечение контролируемого перемещения расплава активной зоны, а также изучение сопутствующих процессов с целью выработки рекомендаций по повышению безопасности энергетических ядерных реакторов нового поколения. При этом класс и сложность экспериментов на ИГР непрерывно повышаются. Со стороны разработчиков новых типов топлива предъявляются дополнительные требования к детализации процессов на всех этапах развития тяжелой аварии с плавлением активной зоны, их расчетному прогнозированию и обеспечению условий для максимально точной реализации заданных параметров эксперимента, что является достаточно сложной задачей для динамических испытаний.

В частности, стоит задача совершенствования подходов к обеспечению заданного энерговыделения в ТВС, характеризующего условия их реальной эксплуатации в энергетическом реакторе; полному учету факторов, приводящих к увеличению давления в полостях облучательного устройства, для обеспечения безопасности эксперимента; определению и установлению диаграммы мощности в облучательном устройстве, обеспечивающей заданную последовательность событий в эксперименте.

Специфичным требованием к проведению экспериментов в реакторе ИГР с модельными ТВС является воссоздание объемного энерговыделения в сборке максимально соответствующего энерговыделению в условиях реальной эксплуатации в энергетическом реакторе. Это позволяет детально смоделировать процессы, протекающие внутри ТВС при развитии аварийной ситуации. В этой связи, выработка и обоснование подходов к формированию заданных характеристик нейтронного поля в объекте испытаний в части обеспечения заданной неравномерности энерговыделения в ТВС является важной задачей методического обеспечения испытаний в ИГР.

При проектировании облучательных устройств обеспечивается многократный запас прочности силовых конструкций к воздействию внутренних нагрузок, связанный со сложностью точного определения их численных значений. Запас прочности формируется за счет существенного увеличения силовых барьеров облучательных устройств. Это приводит к уменьшению полезного пространства для размещения в них ТВС, сокращению потока нейтронов, достигающих топлива, и, следовательно, возможности обеспечения заданных условий испытаний. Ранее, при подготовке экспериментов в ИГР, не учитывался прирост давления за счет выделения примесных газов из расплавленного ядерного топлива в полость облучательного устройства. Наличие примесных газов обусловлено технологией изготовления топливных таблеток. Определение объема газа, реализуемого из таблеток испытываемых ТВС в режимах с плавлением топлива, является важной задачей, решение которой позволит выйти на качественно новый уровень разработки облучательных устройств.

Также при подготовке к проведению исследований в ИГР с модельными твэлами и ТВС энергетических реакторов важным этапом является определение планируемой к реализации диаграммы мощности в объекте испытаний. Диаграмма должна соответствовать поставленным целям и задачам эксперимента, обеспечивать заданную последовательность событий. Она формируется на основании проведения комплекса нейтронно-физических, теплогидравлических расчетов и на результатах соответствующих экспериментальных исследований, направленных на установление связи между энергетическими параметрами облучательного устройства и реактора. Ранее в процессе расчетного обоснования испытаний в ИГР процессы тепломассообмена в устройстве, содержащем модельные ТВС, рассматривались с точки зрения обеспечения заданной программы эксперимента и недопущения превышения параметров, способных повлиять на целостность самого устройства, и не учитывали динамику движения жидкостей и газов. Повышение требований к процедуре испытаний облучательных устройств, предназначенных для более детального исследования процессов, сопровождающих все стадии тяжелой аварии с расплавлением активной зоны, обусловило необходимость выработки новых подходов к созданию расчетных моделей и обеспечивающего математического аппарата.

Все вышесказанные факты определяют необходимость выработки новых методических подходов, обеспечивающих дальнейшее повышение качества подготовки и проведения экспериментов в исследовательском реакторе ИГР.

Целью исследования является разработка новых методических подходов, обеспечивающих повышение качества прогнозирования и реализации заданных параметров испытаний реакторных облучательных устройств для исследования

процессов, сопровождающих тяжелую аварию ядерного реактора с расплавлением активной зоны.

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

1. Выработать подходы к обеспечению заданного аксиального и радиального распределения энерговыделения в модельных твэлах и ТВС;

2. Подтвердить результатами расчетно-экспериментальных исследований возможность обеспечения заданного объемного профиля энерговыделения в твэле и ТВС облучательного экспериментального устройства;

3. Разработать методику определения содержания примесных газов в керамическом ядерном топливе и степень их влияния на параметры реакторных экспериментов;

4. Апробировать в серии реакторных экспериментов разработанную методику определения содержания примесных газов в керамическом ядерном топливе и определить содержание газов в топливе облучательного устройства;

5. Разработать методику определения диаграммы мощности в объекте испытаний, обеспечивающей заданную последовательность событий в эксперименте, основанную на детальном моделировании теплофизических процессов в облучательном устройстве;

6. С высокой точностью реализовать заданные параметры в реакторном испытании твэла с применением разработанной диаграммы мощности в облучательном устройстве.

Методы исследования: эксперименты в реакторе ИГР, расчетное моделирование теплофизических и нейтронно-физических процессов, послереакторные материаловедческие исследования твэлов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Энерговыделение в ТВС при испытаниях в ИГР соответствует эксплуатационному значению при работе в ядерном энергетическом реакторе на быстрых нейтронах, обеспечивая заданную неравномерность в радиальном ($K_r=1,05\pm 0,02$) и аксиальном ($K_z=1,08\pm 0,02$) направлении.

2. Разработанная и апробированная методика определения содержания примесных газов в керамическом ядерном топливе позволяет установить их вклад в суммарное газообразование при экспериментальном моделировании тяжелой аварии ядерного реактора с плавлением активной зоны.

3. Расчетно-экспериментальная диаграмма изменения мощности с интегральным энерговыделением $E=1,56$ кДж/гUO₂ в разработанном облучательном устройстве обеспечивает реализацию заданной последовательности событий, соответствующих развитию тяжелой аварии, в твэле энергетического реактора на быстрых нейтронах.

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

- сформулированы, обоснованы и экспериментально отработаны подходы к обеспечению заданного объемного распределения энерговыделения в твэлах и ТВС при испытаниях в исследовательском ядерном реакторе. Расчетно-экспериментальным путем подтверждена возможность обеспечения заданного объемного энерговыделения в ТВС ($K_r=1,05\pm 0,02$; $K_z=1,08\pm 0,02$), соответствующего реальному при эксплуатации в энергетическом реакторе на быстрых нейтронах;

- разработана и отработана в серии реакторных экспериментов методика определения количества примесных газов, выделяемых из топлива в процессе его плавления. Установлены фактические значения количества примесных газов при расплавлении необлученного керамического ядерного топлива в условиях исследовательского ядерного реактора;

- разработана и апробирована в условиях реакторного эксперимента методика расчета заданной диаграммы мощности в объекте испытаний, основанная на детальном расчетном моделировании теплофизических процессов в облучательном устройстве. Установлено, что интегральное энерговыделение $E=1,56$ кДж/гUO₂ при стационарной мощности $N=14$ кВт обеспечивает в условиях реакторного облучательного устройства корректное воспроизведение последовательности и последствий процессов, сопровождающих развитие тяжелой аварии с расплавлением активной зоны реактора на быстрых нейтронах.

Практическая значимость.

Предложенные методические подходы к прогнозированию и обеспечению заданных параметров реакторных испытаний твэлов позволяют: усовершенствовать процедуру подготовки реакторных экспериментов, расширить методическую базу подготовки и проведения испытаний реакторного топлива в ИГР, повысить качество прогнозирования и реализации заданных параметров испытаний топлива. Все это позволяет расширить спектр экспериментальных программ в поддержку безопасного развития атомной энергетики. Предложенные методики и подходы уже успешно применяются при проведении реакторных экспериментов в ИГР и могут быть использованы при подготовке и реализации экспериментальных программ, связанных с испытаниями реакторного топлива, на других исследовательских реакторах.

Поучены акты о внедрении результатов диссертационной работы в процедуру подготовки экспериментов в ИГР НЯЦ РК, в учебный процесс Факультета базовой инженерной подготовки НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева», а также патент на изобретение «Устройство для испытаний твэлов в экспериментальном канале исследовательского реактора».

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в постановке и формулировке задач исследования, проведении аналитического обзора литературных данных и расчетных исследований, формировании подходов к обеспечению заданного объемного распределения энерговыделения в испытываемых твэлах и ТВС, разработке методики определения содержания примесных газов в керамическом ядерном топливе, выполнении расчетного обоснования конструкций экспериментальных устройств и режимов их испытаний, проведении расчетов, разработке технической, программно-методической и отчетной документации, используемой при проведении реакторных экспериментов.

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 работе получены в рамках выполнения научно-технической программы, реализуемой в рамках программно-целевого финансирования, «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» за 2018-2020 гг. (№ госрегистрации 0118РК01131) по теме «Исследования процессов, происходящих при тяжелой аварии в активной зоне реактора на быстрых нейтронах»; проекта грантового финансирования «Разработка инструментария для моделирования динамики нейтронного поля импульсного исследовательского ядерного реактора» за 2021-2023 гг. (АР09058353).

Степень обоснованности и достоверности результатов, обеспечивается корректностью и системностью проведенных расчетно-экспериментальных исследований, включающих комплекс методических реакторных экспериментов в обоснование предложенных методик, применением хорошо апробированных общенаучных методов исследования. Основные результаты диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК для публикации результатов научной деятельности, а также в рецензируемых зарубежных научных журналах, входящих в базу данных Scopus и Web of Science.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на пяти международных конференциях: VIII межд. конф. «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала, Курчатов, 11-13 сент. 2018 г.»; XIV межд. научно-практ. конф. «Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2018 (Обнинск: 29-30 ноября 2018 г.)»; XXV межд. научно-техн. конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»; X-ой межд. научно-практ. конф. «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров»; VIII межд. конф. «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала, Курчатов 07-09 сентября 2021 г.»

Также результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Физика» ВКТУ им. Д. Серикбаева, на заседаниях научно-технического совета РГП НЯЦ РК, а также на онлайн-семинарах PhD-студентов в Томском политехническом университете.

Публикации

По результатам изложенных в диссертации исследований опубликовано 9 печатных работ, из них в рецензируемых научных изданиях рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК – 6, в журналах индексируемых в базе Scopus – 2 (1 индексируется в Web of Science), получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, трех разделов, заключения и списка использованных источников. Изложена на 144 страницах, содержит 82 рисунка, 9 таблиц и список использованных источников из 130 наименований.