

Махин Валентин Михайлович

**РЕАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТВС С ТВЭЛАМИ ВВЭР ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ В РЕЖИМАХ ПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ
С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

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

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

Нижний Новгород -2005г.



Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Государственный научный центр Российской Федерации «Научно-исследовательский институт атомных реакторов»»

Научный консультант- доктор технических наук Грачев Алексей Фролович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Усынин Герман Борисович

Доктор технических наук, профессор

Малыгин Василий Борисович

Доктор технических наук

Соловьев Сергей Леонидович

Ведущая организация – ФГУП «ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. академика А.И.Лейпунского»

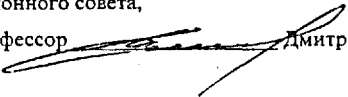
Защита состоится: 22 февраля 2005г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.165.03 при Нижегородском государственном техническом университете по адресу: 603600, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д.24, 5 корпус, ауд. 5232.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета.

Автореферат разослан 10» января 2005г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор технических наук, профессор

 Дмитриев С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

После наиболее крупных аварий на ТМ-2 (1979г.) и на ЧАЭС (1986г.) основным требованием, предъявляемым к ядерной энергетике, является создание социально-приемлемой энергетике, что предполагает обеспечение как безопасности АЭС, так и их конкурентоспособности в сравнении с другими источниками энергии. Одновременное выполнение требований по безопасности и конкурентоспособности АЭС возможно только при разумном консерватизме, основанном на знаниях основных процессов, происходящих в реакторе при условиях нормальной эксплуатации, при нарушениях нормальной эксплуатации и в авариях. Необходимы сведения о характеристиках следующих барьеров: топливной композиции, оболочек твэлов, первого контура и защитной оболочки АЭС и о пределах их работоспособности. Из перечисленных элементов особое значение имеет изучение поведения твэлов как потенциальных источников радиоактивности. Сформулированные положения и задачи составляют комплексную научную проблему «Безопасность АЭС». Исходя из конкретных тем исследований в единой области применения целесообразно выделить специализированную исследовательскую проблему «Безопасность активных зон ВВЭР» - наиболее распространенного и перспективного на ближайшее время реактора для АЭС.

К середине 80-х годов имело место отставание отечественных исследований по безопасности активных зон ВВЭР в сравнении с аналогичными исследованиями по безопасности PWR. За рубежом были в основном завершены программы разнообразных стендовых и реакторных испытаний твэлов и ТВС PWR (выгорание до 35 МВт сут/кг U в испытаниях на реакторе FR-2) в режимах проектных аварий (DBA), и начаты испытания в условиях тяжелых аварий (SFD). В условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA) было изучено поведение как свежих, так и выгоревших твэлов. Исследован выход радионуклидов из топливной композиции в газовую полость твэлов и в теплоноситель первого контура. Развитие получили расчетные методы анализа аварий и созданы коды улучшенной оценки. Результаты испытаний твэлов и расчетных исследований позволили установить критерии безопасности для реакторов PWR и BWR и обосновать безопасность этих установок.

Отсутствие специализированной экспериментальной базы в СССР существенно ограничило объем и качество аналогичных исследований по безопасности активных зон ВВЭР проведением только стендовых испытаний (эксперименты ОКБ «Гидропресс» по деформированию 19-элементных пучков из имитаторов твэлов, ВНИИНМ по изучению

окисления в паре и деформирования оболочек твэлов и др.). В 80-е годы для ликвидации указанного отставания были начаты работы по созданию специализированной водяной петлевой установки на реакторе МАРИЯ (Польша) и реакторной установки ПРИМА - аналога эксплуатируемого реактора RBF (США). Однако эти планы не были выполнены по экономическим причинам. В конце 80-х годов - начале 90-х годов были сформулированы следующие положения проблемы «Безопасность активных зон ВВЭР» (работа отраслевых групп по анализу состояния экспериментальной базы и потребностей в знаниях):

- актуальны представительные испытания отечественных твэлов и ТВС в режимах проектных аварий как для подтверждения безопасности проектов ВВЭР, так и для конкурентоспособности и лицензирования топлива в условиях внедряемой рыночной экономики и вхождения России в мировую экономику;

- для выполнения этих испытаний имеется единственный вариант - использование находящейся в эксплуатации экспериментальной базы, в т.ч. реакторов МИР и ИГР.

При разработке этих положений учтены не только результаты сопоставительного анализа зарубежных и отечественных исследований, но и постоянное совершенствование топливного цикла реакторов ВВЭР и PWR с возможным изменением как условий эксплуатации, так и конструкции твэлов и ТВС. Отмеченная тенденция применительно к реакторам ВВЭР-1000 проявилась в их переводе на эксплуатацию в четырехгодичном топливном цикле с повышением глубины выгорания топлива. В ходе решения этой проблемы выявлены качественные изменения в структуре топлива и характеристиках твэлов при повышении выгорания свыше 40 МВт сут /кг U и в этой связи видна актуальность исследования высоковыгоревшего топлива не только в нормальных, но и в аварийных условиях эксплуатации.

В результате анализа возможностей экспериментальной базы отрасли установлена актуальность подготовки и проведения в возможно короткие сроки на действующей установке ПВП-2 реактора МИР (НИИАР, Димитровград) интегральных реакторных испытаний топлива в режимах, моделирующих проектные и некоторые из запроектных аварий в ВВЭР с потерей теплоносителя (эксперименты LOCA). Эти реакторные эксперименты были предназначены :-

- а) для подтверждения или уточнения основных представлений о поведении твэлов ВВЭР в авариях, которые были разработаны на основе анализа многочисленных экспериментальных данных ВНИИНМ, ВИАМ, ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и других организаций для необлученных имитаторов твэлов;

б) для изучения поведения практически неизученного высоковыгоревшего топлива (выгорание 50-60 МВт сут/кг U);

в) для получения данных, необходимых для верификации кодов, применяемых для обоснования безопасности ВВЭР.

Актуальность решения вышеперечисленных вопросов по безопасности отечественного топлива предопределила цель диссертационной работы - разработку и внедрение комплекса важных для практических приложений научно-обоснованных технических решений по расширению экспериментальных возможностей реактора МИР.М1 для представительных исследований по безопасности топлива ВВЭР в режимах проектных аварий с потерей теплоносителя и получение совокупности данных о поведении в этих условиях топлива с выгоранием 50... 60 МВт сут/кг U.

Актуальность работы подтверждается тем, что она проводилась в рамках Федеральной программы "Топливо и энергия" (подпрограммы "Экологически чистая энергетика", "Безопасность АЭС", "Топливообеспечение атомной энергетики. Развитие ядерно-энергетического топливного цикла атомных электростанций", программа принята Постановлением СМ - Правительством РФ №1265 от 06.12.93 г.) по отраслевым программам конкретного целевого назначения:

- «Экспериментальное изучение работоспособности твэлов и фрагментов ТВС на действующих реакторах СМ-2 и МИР.М1 в режимах, моделирующих переходные и аварийные условия эксплуатации активных зон водо-водяных энергетических реакторов»;
- «Программа испытаний твэлов ВВЭР при параметрах аварии «Малая течь»»;
- «Программа экспериментально-расчетных работ по изучению поведения топлива ВВЭР в условиях аварий (на 1997-1998г)».

Кроме того, часть работ выполнена по программе Миннауки «Реакторные технологии и реакторное материаловедение» (раздел программы «Экспериментальное обоснование новых проектных решений по твэлам и ТВС перспективных реакторов НП-500, НП-1000, ВПБР»).

Указанная цель достигалась решением следующих задач:

- созданием методов реакторных испытаний LB LOCA («Большая течь» или «МПА ВВЭР») и SB LOCA («малая течь») и их внедрением на реакторе МИР.М1 (SB LOCA);
- разработкой и проверкой комплекса технических средств для реализации методов;
- разработкой и внедрением технологии подготовки и проведения сложных реакторных испытаний со свежими и высоковыгоревшими твэлами ВВЭР;

- выбором и апробацией программных средств для расчетного сопровождения испытаний, оценкой качества используемых программных средств и рекомендациями по их совершенствованию;
- обоснованием безопасности испытаний и обращения с топливом после испытаний;
- проведением серии испытаний в широком интервале режимных параметров со штатным топливом ВВЭР различного выгорания (0 и 60 МВт сут/кг U) и получением впервые данных реакторных имитационных испытаний по оведению твэлов ВВЭР в режимах LOCA;
- анализом результатов реакторных испытаний и посттестовых исследований и разработкой рекомендаций по их применению при обосновании безопасности действующих и проектируемых установок с реакторами ВВЭР.

Научная новизна работы.

1. *Впервые* в отечественной практике получены результаты реакторных испытаний ТВС с твэлами ВВЭР (необлученными и с выгоранием 56...60 МВт сут/кг U) в режимах аварии с потерей теплоносителя и частичным осушением твэлов с температурой оболочек 540...1250°C, и получены сведения о состоянии ТВС (твэлов и дистанционирующих решеток), выходе радионуклидов из топливной композиции под оболочку твэлов и в теплоноситель в режимах, приближенных к условиям аварий.

2. В сравнительных испытаниях необлученных (свежих) и высоко выгоревших твэлов с выгоранием 55...60 МВт сут/кг U экспериментальным путем показано, что основное отличие проявляется только в выходе газообразных продуктов деления из топлива с высоким выгоранием и в воздействии газового давления на оболочку. Окисление и механические свойства оболочек свежих и высоко выгоревших твэлов практически не отличаются. В режиме LOCA выход РБГ из топлива с выгоранием 56 МВт сут/кг U под оболочку твэлов при температуре периферийной части сердечника 850...1050 °C равен 7-9 %.

3. Получены сведения о теплофизических характеристиках твэлов ВВЭР в режиме с их частичным осушением и в последующем QUENCH-режиме (закалка при повторном смачивании), а именно: данные по минимальной температуре оболочки при переходе от устойчивого пленочного кипения на поверхности оболочек в дисперсном режиме течения к переходному пузырьковому кипению. В режиме с частичным осушением ТВС установлено значительное влияние тепло-массообмена между «горячими» и «холодными» ячейками, приводящего к выравниванию температуры оболочек в зоне осушения. На натуральных изделиях подтверждено влияние паро-капельного охлаждения в дисперсном режиме течения

теплоносителя вблизи границы раздела фаз на состояние ТВС (охлаждение решеток и, соответственно, локальное охлаждение оболочек твэлов в области решеток).

4. Получены данные о состоянии ТВС ВВЭР с натурными дистанционирующими решетками как из нержавеющей стали, так и из сплава циркония. Анализом состояния решеток и твэлов, а также литературных данных об особенностях дисперсного режима течения теплоносителя в режимах с частичным осушением активной зоны и на стадии «Повторный залив» в максимальной проектной аварии установлено более интенсивное охлаждение паро-капельным потоком дистанционирующих решеток, чем твэлов, что положительно влияет на сохранение работоспособности решеток и ТВС в целом как единого изделия.

5. Научная новизна и значимость настоящей работы заключаются также в решении научной проблемы - создании методологии исследований, в которой реализован целенаправленный, комплексный подход к изучению поведения твэлов и ТВС в проектных авариях с потерей теплоносителя, включающий обоснование необходимости проведения испытаний с фрагментом ТВС, воспроизведение в ограниченном объеме канала исследовательского реактора основных стадий аварии и установление влияния таких принципиально важных особенностей как высокое выгорание твэлов на поведение этих твэлов в аварии. Предложенные технические решения защищены 5 авторскими свидетельствами.

Практическая ценность и внедрение результатов работы.

Полученные в работе результаты представляют практический интерес и востребованы разработчиками твэлов (ВНИИНМ, ОКБ «Гидропресс», ОКБМ), изготовителями твэлов и ТВС (АОЗТ «МСЗ») и зарубежными пользователями российского топлива (АЭС Ловниза). Созданные методики испытаний позволили не только получить имеющие практическое значение результаты (безопасность активной зоны во внедряемом 4-х годичном цикле), но и применимы в дальнейшем для новых технических решений по совершенствованию топливного цикла водоохлаждаемых реакторов и повышению безопасности топлива. Среди практических рекомендаций, заключений и выводов, сделанных на основании выполненной работы, наиболее важными являются следующие.

1. На основе анализа потребностей в знаниях о поведении топлива в авариях и обзора зарубежных и отечественных данных определена предметная область исследований на реакторе МИР по проблеме «Безопасность активных зон ВВЭР». Это испытания твэлов для лицензирования топлива, а именно: в режимах LOCA и с кратковременной потерей расхода (LOF), проверка решений по управлению аварией в части снижения радиационных последствий и обращения с топливом после аварии и проверка качества методик расчета

характеристик твэлов в условиях аварий. Установление предметной области исследований важно для перспективного отраслевого планирования работ по безопасности ВВЭР.

2. Для решения проблемы «Безопасность активных зон ВВЭР» разработан и внедрен комплекс научно-технических решений по расширению экспериментальных возможностей реактора МИР.М1; созданы методики испытаний, выполнены работы по модернизации установки; проведены стендовые испытания оборудования и реакторные испытания с отечественным топливом. Разработана технология подготовки и проведения сложных реакторных экспериментов, в том числе с высоко выгоревшим штатным топливом ВВЭР, оснащения устройств датчиками и обращения с топливом до и после испытаний. На Техническом Комитете МАГАТЭ 9-13 октября 1995г. по проблеме «Поведение элементов (материалов) активной зоны LWR в условиях аварий» результаты первого методического испытания были оценены как значительное продвижение для решения вопросов по верификации кодов и для оценки разбираемости активной зоны после аварии (IAEA-TECHDOC-921, стр. 10).

3. Разработаны методики испытаний фрагментов ТВС ВВЭР в режиме аварий МАЛАЯ ТЕЧЬ с частичным осушением активной зоны (методика SB LOCA) и в режиме максимальной проектной аварии (методика LB LOCA или методика МПА ВВЭР). Поскольку комплексная проблема «Безопасность АЭС», как и многие другие, жизненно необходимые для человечества проблемы, не может быть решена полностью и «закрыта» (совершенствуется топливный цикл, разрабатываются новые проекты реакторных установок, снижается степень консервативности), полученные результаты по методологии и технологии испытаний крайне важны для реакторной проверки разрабатываемых новых технических решений и поэтому являются основополагающими по своей сути. Поэтому исходя из вышеизложенного подхода к проблеме «Безопасность АЭС» методическая часть квалификационной работы представлена в большем объеме, чем использовано в выполненных реакторных испытаниях. Модернизация имеющейся экспериментальной базы (вместо запланированных установок ВПУ МАРИЯ и реактора ПРИМА) обусловила экономический эффект от внедрения методик и научно обоснованных решений.

4. Проведены испытания ТВС ВВЭР при пониженном и повышенном давлении теплоносителя и сравнительные испытания необлученных (свежих) твэлов и твэлов с выгоранием топлива до 60 МВтсут/кг U. Уровень выгорания 55... 60 МВтсут/кг U соответствует внедряемому перспективному четырехгодичному топливному циклу ВВЭР и PWR. Результаты сравнительных испытаний свежих и высоко выгоревших твэлов

использованы при лицензировании топлива для отечественных и зарубежных (Ловииза) АЭС с ВВЭР.

5. Сформировано расчетное сопровождение испытаний, которое необходимо как для прогнозирования режимов испытаний, так и для оценки качества используемых кодов. Подтверждена консервативность кодов RELAP, KOPCAP и КАНАЛ (из аттестованного комплекса ТРАП). Опыт применения программ и рекомендации по их совершенствованию изложены в докладах на специализированных семинарах и конференциях по динамике и безопасности реакторов, т. е. доступны широкому кругу расчетчиков.

6. Значительное количество проектных аварийных режимов может происходить при температуре оболочек твэлов 350...750 °С (LOCA при разрыве Ду 100 НВ АЭС, вторая стадия МПА для большинства твэлов ВВЭР-1000 и PWR, LOF с мгновенным заклиниванием одного ГЦЭН из четырех и др.). Полученные положительные результаты испытаний в этом диапазоне температуры оболочек твэлов (твэлы герметичны, формоизменения незначительны) важны для обоснования безопасности активной зоны ВВЭР как демонстрационные испытания фрагмента ТВС.

Результаты испытаний послужили основанием для согласования технического решения ТР 179-ТП «Обоснование работоспособности (живучести) твэлов в аварийном режиме МПА ВВЭР-440 первого поколения, описываемом в ОУОБ 3 блока НВАЭС», а также использованы при обосновании безопасности реактора ВК-50.

7. В области температуры свыше 750 °С (до 1250 °С) получены сведения о состоянии твэлов и дистанционирующих решеток из нержавеющей стали и сплава циркония, о формоизменении оболочек, о разгерметизации оболочек и выходе радионуклидов из топлива и в теплоноситель. Результаты важны как для проверки расчетных моделей и представлений о поведении топлива, так и для прогнозирования состояния ТВС в целом ряде аварий.

8. На стадии повторного залива в «жестких» испытаниях при предельной температуре оболочек для проектных аварий установлен импульсный рост активности теплоносителя в результате разгерметизации и разрушения оболочек при замене дисперсного режима течения на однофазный, жидкостный режим (смачивание оболочки с термошоком). Для практических приложений получена амплитуда термошока в широком интервале давления, изучен выход радионуклидов под оболочку твэлов и в теплоноситель.

9. Испытания проведены при условиях, подобных или более жестких, чем режимы проектных и некоторых запроектных LOCA на ВВЭР («Малая течь» с несрабатыванием аварийной защиты, увеличенная длительность второй стадии LB LOCA). Для большинства проектных аварий получены результаты, демонстрирующие приемлемые характеристики

твэлов. Проблемными являются вопросы поведения твэлов в авариях с температурой оболочки около верхней границы (1200 °С) и при последующем заливе. Вместе с тем, как правило, техническими решениями и доказанной консервативностью кодов в режимах DBA обеспечивается запас по температуре до указанного предельного значения.

10. В рамках концепции разумного консерватизма подготовлено предложение о введении дополнительного критерия по обращению с топливом после аварии, основанного не только на степени локального окисления оболочки (современный критерий), а в большей степени на состоянии ТВС в целом как изделия.

Положения, выносимые на защиту.

Автор защищает:

- методики реакторных испытаний фрагмента ТВС ВВЭР в условиях, максимально приближенных к режимам аварии с потерей теплоносителя и осушением твэлов (авария LOCA);

- результаты реакторных испытаний фрагментов ТВС ВВЭР в условиях аварии LOCA (испытания необлученных (свежих) и выгоревших до выгорания 60 МВтсут/кг U твэлов в интервале температуры оболочки от 540 до 1250 °С при различном давлении и массовой скорости теплоносителя);

- результаты анализа поведения твэлов ВВЭР в режимах LOCA (по данным реакторных и стендовых испытаний, а также посттестовых исследований) и заключения по безопасности активной зоны ВВЭР;

- разработанные на основе анализа результатов реакторных испытаний и посттестовых расчетно-экспериментальных исследований практические выводы по применимости кодов RELAP, MELCOR, КАНАЛ (из комплекса ТРАП) и КОРСАР и оценке их консервативности применительно к изучаемым режимам, а также рекомендации по совершенствованию теплогидравлических кодов.

Достоверность и обоснованность научных положений определяется использованием инструментированных экспериментальных устройств, применением аттестованных средств измерений основных параметров, проведением серии испытаний и сопоставительным анализом данных реакторных и стендовых экспериментов и посттестовых исследований.

В целом, создание методик реакторных испытаний топлива в режиме LOCA и проведение испытаний со свежим и высоко выгоревшим топливом ВВЭР в широком интервале температуры твэлов от 540 до 1250 °С при различных условиях нагружения оболочек, анализ результатов и разработка заключений и рекомендаций по результатам испытаний и посттестовых исследований можно квалифицировать как решение научной

проблемы по созданию методологии реакторных испытаний и существенный вклад в решение актуальной комплексной проблемы «Безопасность активных зон ВВЭР».

Работа выполнена автором во ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР» в творческом сотрудничестве со специалистами ВНИИНМ (формирование программ исследований по безопасности топлива, разработка и изготовление твэлов), ОКБ «Гидропресс» (формирование программ исследований по безопасности и анализ результатов), ВНИПИЭТ (проектные работы), ОКБМ (совместные работы по испытанию интерметаллидного топлива, верификация кодов на основе реакторного эксперимента), РНЦ «Курчатовский институт» (экспертиза материалов при подготовке заседания секции НТС МАЭ, расчет межячейкового тепло-и массопереноса), ФЭИ (измерение паросодержания и экспертиза материалов при подготовке заседания секции НТС МАЭ). Особенностью работы является широкое обсуждение результатов каждого из этапов выполнения программы.

Личный вклад автора. С активным, творческим участием автора разрабатывалась идеология экспериментов, создавались технические средства для реализации требуемых режимов, автором на основе теории приближенного или частичного подобия была показана необходимость проведения испытаний фрагмента штатной ТВС и возможность реализации в ограниченном объеме испытательного канала требуемых условий испытаний, разрабатывались программы посттестовых исследований, которые выполнялись специализированными подразделениями НИИАР. Автор непосредственно участвовал в получении и анализе результатов.

В представленной диссертационной работе личный вклад автора является определяющим в части разработки методологии испытаний, анализа полученных результатов и разработки на основе анализа рекомендаций по применимости результатов.

Апробация работы. Материалы работы докладывались:

на Техническом Комитете МАГАТЭ «Technical Committee on Behavior of LWR Core Materials under Accident Conditions», Dimitrovgrad, Russia, October 9-13, 1995;

на международных теплофизических конференциях :

“Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР”, Теплофизика-95, ФЭИ, Обнинск, 1995 ,
Теплофизика-98, ФЭИ, Обнинск, 1998;

на международной конференции по безопасности водоохлаждаемых реакторов –
Twenty-Sixth Water Reactor Safety Information Meeting, Maryland, October 26-28, 1998;

на 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 19-23 ноября 2001г., Подольск;

на 6-й Российской конференции по реакторному материаловедению, 11-15 мая 2000 г., Димитровград;

на отраслевой конференции "Гидродинамика и безопасность АЭС", Теплофизика-99. ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск, 28-30 сентября 1999г.;

на семинарах секции №3 НТС №1 МАЭ РФ "Экспериментальное обоснование безопасности ЯЭУ и верификация расчетных кодов: экспериментальная база, системы измерений, программы исследований, основные результаты", Димитровград, май, 1993г.,

"Динамика энергоблоков атомных станций нового поколения", г. Сосновый Бор, 30 мая - 3 июня 1994г., НИТИ, 1994,

"Математическое и физическое моделирование ядерных реакторов и петлевых установок, проблемы верификации", Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996;

на заседании секции №3 НТС №1 МАЭ РФ 23 декабря 1998г., специально посвященном рассмотрению программы и результатов экспериментов на реакторе МИР.М1 по безопасности ВВЭР;

на 4-й и 5-й межотраслевых конференциях по реакторному материаловедению, ГНЦ РФ НИИАР, Димитровград, 15-19 мая 1995г. и 8-12 сентября 1997г.

на заседании международной группы по проблеме «Повторного залива»-Third International Quench Workshop, Forschungszentrum Karlsruhe, December 2-4, 1997;

на японско-российском семинаре - Japan-Russian seminar, September, 6-12, 1998.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений. Диссертация изложена на 328 стр., включая 83 рис., 34 табл., 4 приложения на 57 стр., содержит список литературы из 175 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обосновывается актуальность рассматриваемой проблемы, излагаются цели и задачи, решаемые в представляемой на защиту работе, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В *первой главе* рассмотрены основные требования МАГАТЭ по безопасности активной зоны реакторов и результаты расчетно-экспериментальных исследований по безопасности топлива водоохлаждаемых реакторов, а также сформулированы цель и задачи исследования. Основные положения данной главы основываются на опубликованной обзорной работе «Аварии с тяжелым повреждением активной зоны водоохлаждаемых реакторов. Методы и результаты исследований» (в 2-х частях, Алексеев А.В. и Махин В.М.) и зарубежных обзоров (Карб Е.Г., Гофман П., Эрбахер Ф. и др.).

Установлено, что в каждой из ведущих стран, кроме СССР, к середине 80-х годов проведены реакторные испытания с моделированием состояния твэлов в режиме аварии с потерей теплоносителя (испытания или тесты LOCA). Реакторные испытания - это демонстрационные эксперименты, необходимые для проверки представлений о поведении топлива в авариях и для верификации кодов, а также позволяющие оценить радиационные последствия и проверить приемы обращения с топливом после аварии. Результаты испытаний важны для проверки качества программных средств - основного инструмента для анализа аварий.

Если в США для проведения испытаний LOCA были созданы специализированные реакторные установки LOFT и PBF, то во Франции, Германии и Японии были усовершенствованы находящиеся в эксплуатации. Согласованность зарубежных программ исследований, выполненные испытания и широкое обсуждение получаемых результатов позволили выработать критерии безопасности и внедрить концепцию разумного консерватизма. Так, с учетом результатов исследований, требования КАЭ США (с 1974г. NRC) по критериям изменялись. Ограничение по температуре оболочек в LOCA на начальном этапе исследований в 1970 г. было : не более 1400 °С, в 1973 г.- 1260 °С, в настоящее время - 1200 °С. Таким образом, действительно, испытания крайне важны для решения проблемы «Безопасность активной зоны».

Наряду с развитием экспериментальных исследований успешно разрабатывались комплексы программных средств - основной инструмент анализа аварий на АЭС. Результаты экспериментов служили основой для верификации этих средств. Практически каждая из ведущих стран имеет свои национальные программные средства так называемой улучшенной оценки параметров аварийных режимов.

С середины 80-х годов были широко развернуты испытания с тяжелым повреждением топлива - SFD-тесты, а также разрабатывались программные средства для расчетного анализа тяжелых аварий. В начале 90-х годов эта программа исследований в основном была также завершена.

В СССР подобные представительные исследования по безопасности топлива в режимах LOCA предусматривались на реакторе ПРИМА и на создаваемой в Польше водяной петлевой установке (ВПУ) МАРИЯ. Эти установки проектировались с задержкой в сравнении с западными аналогами на 10-15 лет. Во второй половине 80-х годов установлена невыполнимость этих программ из-за отсутствия финансовых средств. Поэтому в конце 80-х годов единственными вариантами устранения отставания в исследованиях по безопасности топлива стали: использование имеющихся в России исследовательских реакторов, создание

сравнительно недорогих стендовых установок и широкое участие в международных программах исследований, а также анализ отечественных и зарубежных результатов.

Дефицит данных для обоснования безопасности отечественного топлива проявился в связи с введением в России рыночной экономики и целесообразностью активного участия в мировой экономике. Для демонстрации конкурентоспособности отечественного топлива были необходимы надежные данные по поведению топлива как в условиях нормальной эксплуатации, так и в аварийных режимах. Таким образом, была видна настоятельная необходимость проведения в сжатые сроки представительных испытаний отечественного топлива.

Этот вывод не означает, что до указанного периода обоснованию безопасности топлива в СССР не уделяли внимания. Для обоснования проектов ВВЭР и РБМК в 70-х и в начале 80-х годов выполнены программы стендовых исследований (ВНИИНМ, ОКБ «Гидропресс», ВИАМ и др.). Так в период 1981- 1985 г.г. специалисты ВНИИНМ на разных международных конференциях и встречах (Espoo, Finland, 1980г., Paris, 1981г., Denmark, 1983г., Vienna, 1984г. и др.) выступали с сообщениями о программах и результатах стендовых исследований (более 150 испытаний с деформированием газонаполненных оболочек в среде пара, изучение окисления отечественного сплава, создание первых кодов и другие работы). В этот период были начаты стендовые исследования в ОКБ «Гидропресс» с изучением степени перекрытия проходного сечения ТВС в режимах LOCA, разработаны программные средства «ТЕЧЬ-М4», «Динамика» и др. В 1982г. были приняты отечественные критерии по безопасности ВВЭР в режимах LOCA (ОПБ-82). *Однако по объему, разновидности испытаний и по получаемым результатам (оснащенность испытаний датчиками, измерительные системы и т.п.) отечественные исследования невыгодно отличались от зарубежных исследований.* Для подтверждения достаточно рассмотреть принятую в 1985г. (когда уже в основном были завершены аналогичные зарубежные исследования) отраслевую программу из 80 испытаний по безопасности топлива ВВЭР на ВПУ МАРИЯ, составленную разработчиками реакторов ВВЭР и твэлов для этих реакторов.

До настоящего времени имеет место дискуссия о правильности выбора в 1982г. отечественных критериев по безопасности активной зоны ВВЭР. Вместе с тем, подобных вопросов не возникает по аналогичным зарубежным критериям, что также характеризует незавершенность отечественных исследований и актуальность проблемы «Безопасность активной зоны».

В конце 80-х и в начале 90-х годов в связи с необходимостью оптимизации топливного цикла возникла важная проблема – повышение выгорания топлива, что привело к

необходимости изучения надежности и безопасности активной зоны с высоковыгоревшими твэлами. Если до этого периода за рубежом ограничивались исследованием топлива с выгоранием до 36 МВт сут/кг U (в СССР из-за отсутствия специализированной экспериментальной базы испытания свежего и выгоревшего топлива в режимах LOCA не проводились), то практический интерес стали представлять знания о поведении топлива с выгоранием до 60 МВт сут/кг U. Эту новую актуальную научную проблему было необходимо решать параллельно с устранением общего дефицита данных по безопасности топлива.

Приведенный анализ обосновал актуальность исследований по решаемой научной проблеме, предопределил цель и задачи реакторного исследования. В качестве объекта испытаний выбран фрагмент ТВС, а не одиночный твэл. Этот выбор основывается как на результатах зарубежных исследований (установлено различие в условиях охлаждения и поведении одиночных твэлов и твэлов в пучке), так и на необходимости моделирования в испытаниях влияния таких элементов и факторов как дистанционирующие решетки и неравномерность распределения температуры по периметру твэлов.

Во *второй главе* (методической) рассмотрена научная проблема, включающая принципы моделирования, возможности воспроизведения в сравнительно малом объеме канала условия в ТВС при аварии с потерей теплоносителя, основные положения двух методик испытаний «большая течь» или LB LOCA и «малая течь» или SB LOCA, которые позволяют исследовать поведение топлива практически во всех проектных авариях с потерей теплоносителя; изложены сведения о кодах как для изучения аварий на ВВЭР, так и для расчетного сопровождения испытаний и об опыте их применения. Методология исследований разработана в большем объеме, чем использовано в исследованиях, что обеспечивает при необходимости перспективы дальнейших исследований, например, при совершенствовании топлива или оптимизации эксплуатации активных зон.

В работе автором представлены и обоснованы следующие основные положения по указанной научной проблеме:

1. В реакторных и стендовых экспериментах по изучению состояния топлива в аварийных режимах LOCA реализуется частичное подобие процессов или «приближенное подобие» (в пределах действия одинаковых механизмов тепло- и массопереноса в модели и натурном объекте). Поэтому в каждом эксперименте необходимо определять выполнимость указанного условия. Обоснованы испытания 19-элементного фрагмента ТВС ВВЭР высотой 1 м. В испытаниях на реакторе МИР обеспечивается моделирование процессов в ТВС, а проблемы контурного, внутрикорпусного, межкассетного и внутрикассетного тепло-массообмена

целесообразно решать в экспериментах на стендах. Обоснован выбор реактора МИР.М1 для реакторных испытаний и определена предметная область исследований на реакторе по безопасности топлива ВВЭР и взаимосвязь реакторных и стендовых испытаний (рис.1).



Рис.1. Стендовые и реакторные исследования по безопасности ВВЭР.В интегральных испытаниях на фрагменте ТВС воспроизводятся стадии аварии ; в поддерживающих экспериментах изучаются теплофизические и коррозионные характеристики, механические свойства и взаимодействие материалов при определенных условиях (в работе приведены основные сведения по этим методикам и оригинальные, защищенные авторскими свидетельствами технические решения).

Вследствие своих конструктивных и физических возможностей реактор МИР.М1 оказался в приоритетном положении при выборе установки для реакторных испытаний LOCA отечественного топлива. Имеется возможность проведения на одной площадке (в пределах НИИАР) не только реакторных испытаний, но и посттестовых исследований, подготовка испытаний высоко выгоревшего топлива. Кроме того, персонал реактора и исследовательских лабораторий имеет значительный опыт подготовки и проведения сложных реакторных испытаний и посттестовых исследований.

2. Реактор МИР.М1 – каналный реактор с высотой активной зоны 1 м и экспериментальными ячейками для испытаний топлива и материалов. Рабочие и экспериментальные каналы размещены в бериллиевых блоках. В данных испытаниях применялась ячейка 2-4 с диаметром 130 мм. Каждая ячейка окружена шестью рабочими ТВС, мощность которых измеряется калориметрическим способом. Около ячейки 2-4 размещены пять органов регулирования, что позволяет реализовать управляемый режим испытаний необлученного (свежего) и высоко выгоревшего топлива с моделированием как

номинального режима, так и уровня мощности при остаточном тепловыделении в реакторе ВВЭР.

В конце 80-х годов на реакторной установке была смонтирована петлевая установка (ПУ) ПВП-2, основное отличие которой от других ПУ заключается в возможности проведения испытаний с высокоактивным теплоносителем (примерно в 1000 раз выше допустимый уровень активности теплоносителя, чем в ранее созданных установках). Такая возможность обеспечена наличием гермооболочки и другими системами безопасности. Для проведения испытаний LOCA установка ПВП-2 дооснащена оборудованием и показана достижимость и безопасность проведения на ней экспериментов по безопасности ВВЭР.

3. Разработаны и проверены на практике два метода испытаний:

первый, подобный реализованному в испытаниях на реакторе PBF (США) и прорабатываемых экспериментах на реакторах МАРИЯ и ПРИМА. Этот метод характеризуется организованным сбросом теплоносителя в специальную емкость при «модельном» снижении энерговыделения в ЭТВС (метод LB LOCA);

второй, подобный реализованному в испытаниях на реакторах FR-2 в Германии и Siloe во Франции, который отличается от первого метода тем, что контур остается герметичным и изменяются только параметры теплоносителя (метод SB LOCA и вторая стадия LB LOCA). Путем изменения давления, массовой скорости теплоносителя и мощности реактора реализуются режимы отдельных стадий LOCA.

Основы метода LB LOCA разработаны при проектировании ВПУ реактора МАРИЯ (специалистами ОКБ «Гидропресс») и ПРИМА (специалистами ОКБ «Гидропресс» и НИИАР).

Отличие разработанных с участием автора методик от большинства зарубежных - это проведение испытаний с фрагментом ТВС, а не с единичными твэлами, как это выполнено в испытаниях на реакторах PBF, FR-2, Siloe. В рассматриваемых испытаниях обеспечивается воспроизведение режимов наиболее опасных стадий аварии.

4. Созданы методики испытаний фрагмента ТВС ВВЭР в режимах LB и SB LOCA, разработан проект реконструкции ПУ ПВП-2 реактора МИР.М1 (совместно с ГИ ВНИПИЭТ), дооснащена ПУ ПВП-2 необходимым оборудованием, разработаны и изготовлены твэлы и облучательные устройства, и успешно проведена серия испытаний.

Особенности реакторных испытаний LB LOCA следующие (рис.2):

- в номинальном режиме испытаний ТВС открываются две сбросные линии;

- отключаются «немодельные» части контура (из-за значительного объема воды в контуре и в канале необходим сброс теплоносителя из ограниченного объема) и одновременно или ранее открывается байпас канала («зануление» расхода);
- снижается мощность ТВС по определенному закону (введение малой отрицательной реактивности);
- подается в канал пар и в дальнейшем «холодная» вода для реализации стадии повторного залива со смачиванием и закалкой оболочек (QUENCH- режим);
- анализируется состав теплоносителя из контура на содержание радионуклидов и водорода – продукта паро-циркониевой реакции.

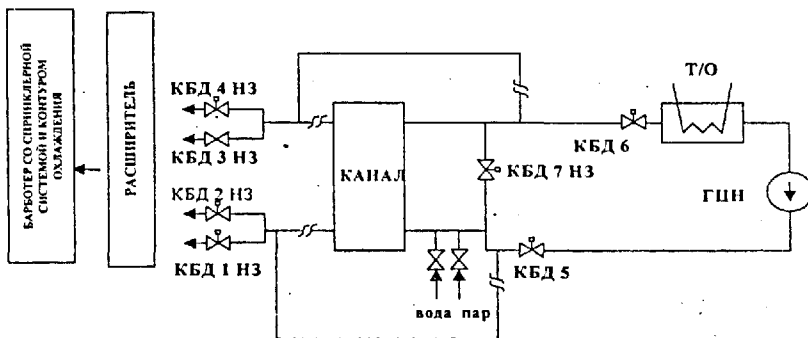


Рис.2. Упрощенная схема установки для испытаний LB LOCA.

КБД- клапан быстрого действия разработки ЦКБА; НЗ, НО – нормально закрытый, открытый клапан; ГЦН – насос; КБД 1-4 – клапаны двух линий сброса, КБД 5 и 6 – отсечные клапаны; вода, пар – линии подвода от системы аварийного охлаждения (САО) и газо-парового компенсатора давления (ГПКД).

Изложены алгоритм испытаний, конструкция канала, облучательных устройств и обоснованы как достижимость режимов, так и безопасность испытаний. Расчеты выполнены специалистами ОКБ «Гидропресс» и НИИАР. На критическом стенде реактора с применением макета канала и ТВС определены эффекты реактивности при загрузке канала в реактор и при изменении агрегатного состояния теплоносителя в канале. Оптимизированы размеры опускающего участка и защитного корпуса канала для снижения положительного эффекта реактивности при запаривании канала. Проведены стендовые испытания клапанов КБД, изготовлен макет канала, подтверждена возможность его установки в ячейку реактора и проведения всех технологических операций с каналом.

Одной из основных систем является система имитации потерь теплоносителя (СИПТ), которая изготовлена, смонтирована на стенде в масштабе 1:1 и успешно испытана. СИПТ

состоит из двух сбросных трубопроводов Ду 200, каждый из которых оснащен двумя КБД, расширителя и барботера (см. рис.2). Трубопроводы входят в расширитель, выполненный в виде двух соединенных трубками торцов Ду 300 каждый. Нижний тор соединяется 14 трубками Ду 32 с барботером, оснащенный спринклерной системой. В контуре предусмотрены Z-участки для компенсации ударных воздействий.

Испытаниями СИПТ установлено, что подбором дросселей в сбросных линиях обеспечивается заданный спад давления в контуре (рис.3). Разработана на основе кода RELAP и верифицирована расчетная модель сбросного тракта.

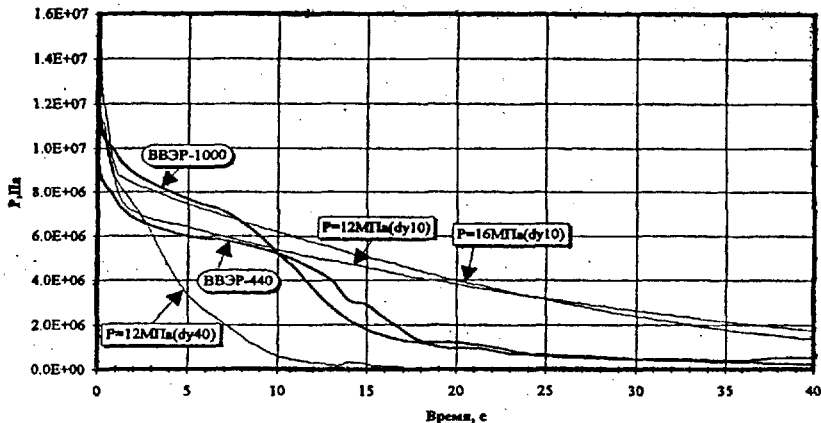
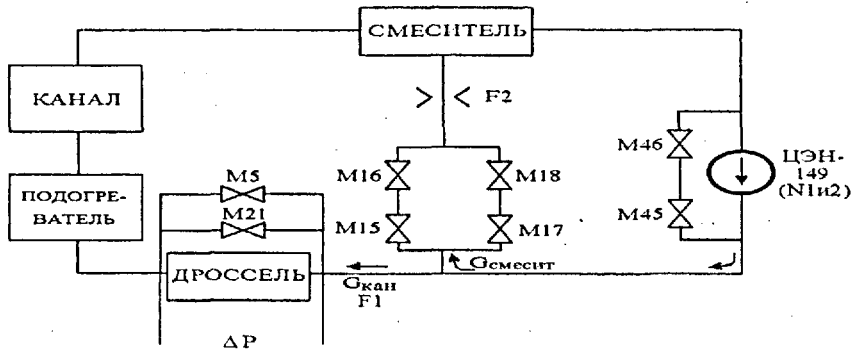


Рис.3. Результаты испытаний СИПТ. Изменение давления в отсекаемом участке стенда.

Указано начальное давление и диаметр дросселей в сбросных линиях.

Испытанная в стендовых условиях методика внедрена в проекте «Реконструкция ПУ ПВП-2» и в проектные разработки ПВП-3.

Упрощенная схема установки для испытаний SB LOCA приведена на рис. 4. Согласно методике SB LOCA также реализуются четыре режима испытаний: *номинальный* (параметры ВВЭР по температуре и давлению теплоносителя, а также по тепловой нагрузке твэлов); *переходный* (не модельный режим, необходим для подготовки режима LOCA); *режим LOCA* с частичным осушением твэлов (примерно 50% активной части твэлов) и режим *смачивания* (заковки или QUENCH-режим). «Немодельность» переходного режима не влияет на результаты, поскольку, как показала авария на ТМ1-2, длительное время имеет место объемное кипение теплоносителя перед частичным или полным осушением. В этом режиме с низкой температурой твэлов вряд ли возможна разгерметизация твэлов.



$G_{кан}$ - расход теплоносителя в канале
 $G_{смесит}$ - в байпасной линии со смесителем

Рис.4. Упрощенная схема установки для испытаний ТВС SB LOCA и во второй стадии LB LOCA.

Режим с частичным осушением достигается контролируемым снижением расхода теплоносителя в канале и последующим медленным, контролируемым повышением мощности ТВС. «Выход» из режима LOCA осуществляется снижением мощности и реализацией QUENCH-режима с заданной скоростью перемещения границы раздела фаз или в жестком режиме с увеличенным расходом холодной воды.

Важными элементами, предложенными автором для проведения испытаний SB LOCA на ПВП-2 реактора МИР, являются узел регулирования расхода от 2,7 кг/с до 0,006 кг/с и система подогрева теплоносителя, необходимая для испытаний на нулевой мощности реактора и для отработки методики (определение количества тепла, отводимого в бассейн реактора, проверка работоспособности датчиков и др. технологические операции).

ТВС и канал оснащены ТЭП для измерения температуры оболочек и сердечника твэлов, температуры и паросодержания теплоносителя в ЭТВС.

При модернизации ПВП-2 смонтированы: подогреватель, узел регулирования расхода, байпас теплообменника, дооснащена система контроля радиационной безопасности, внедрена система измерения водорода в теплоносителе ПУ, внедрена система АСНИ на новой элементной базе, внесены изменения в систему управления.

5. Разработаны конструкции твэлов: неинструментированных и инструментированных датчиками давления и термоэлектрическими преобразователями (ТЭП) в сердечнике и в пазах, выполненных в оболочке. Кроме измерения температуры твэлов, определялись паросодержание (датчики ФЭИ) и температура теплоносителя..

Типичное оснащение устройства средствами измерений приведено на рис. 5. Как правило, температура теплоносителя измерялась на входе в ЭТВС и в двух ячейках на выходе. Подъемный участок также оснащался ТЭП и датчиком паросодержания. Способы установки ТЭП на оболочке – пайка в пазах по технологии НИИАР или прижатие накладкой. Датчики паросодержания размещены в подъемном участке и в ячейке 1-2-13 на двух уровнях по высоте ТВС.

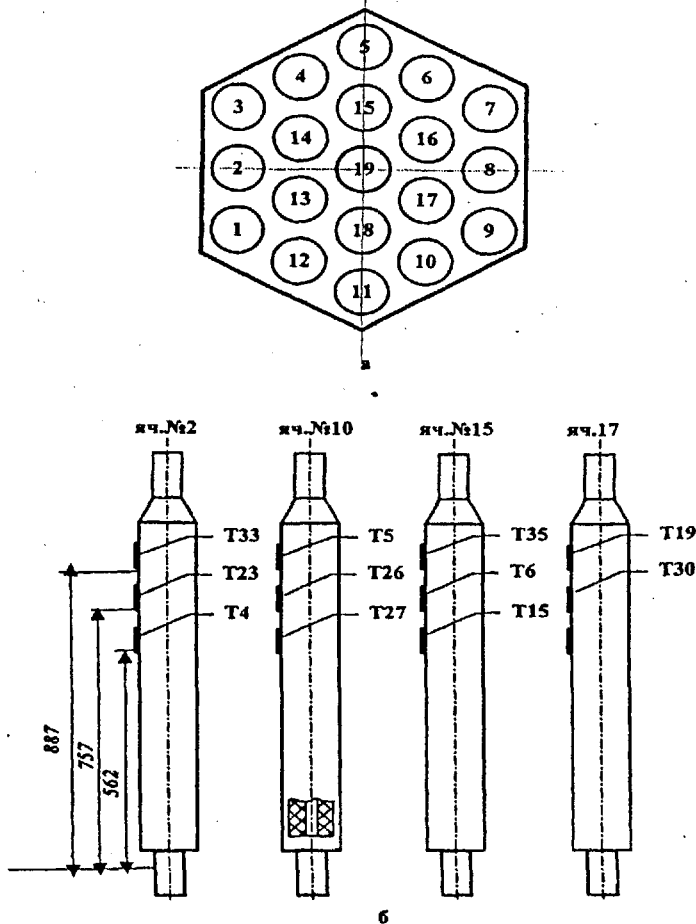
Автором выполнен анализ погрешностей измерений температуры оболочки в переходных режимах с изменением агрегатного состояния (приведен в приложении №2).

6. По техническим заданиям, разработанным автором, создано несколько вариантов конструкций облучательных устройств и каналов для испытаний. Каналы типа каналов Фильда имеют защитный и основной корпусы, пространство между которыми вакуумируется или заполняется азотом или гелием, что позволяет регулировать теплосъем из опускного участка в бассейн реактора. Основной корпус оснащен ТЭП и датчиками прямого заряда для контроля относительного изменения энерговыделения в процессе испытаний.

Испытаны два варианта конструкций облучательных устройств, отличающихся оснащением датчиками и исполнением разделителя между опускным и подъемным участками. В первом варианте разделитель выполнен в виде трубы, которая является и корпусом подвески. Малое термосопротивление разделителя позволяет снизить температуру теплоносителя в выходном трубопроводе (предельная температура - 500 °С), но в этом случае возможны: значительный подогрев теплоносителя в опускном участке до температуры насыщения (T_s) и поверхностное кипение теплоносителя с влиянием на расход теплоносителя в ТВС. Поэтому первый вариант применялся при высоком давлении теплоносителя ($P=12$ МПа) и сравнительно высоком расходе 0,04 кг/с (массовая скорость ~ 25 кг/(м² с)).

На рис. 6 приведен второй вариант конструкции с разделителем, имеющим теплоизоляцию между подъемным и опускным участками в виде паро-жидкостных прослоек. Предусмотрен отвод конденсата в эти прослойки (исключение стекания конденсата в полость ЭТВС).

Схема размещения термометрированных твэлов и датчиков температуры в ЭТВС



а – поперечное сечение ЭТВС; ①, ② – твэлы с ТЭП внутри топливного сердечника; ③, ④, ⑤ – твэлы с ТЭП на поверхности оболочки.
 б – расположение ТЭП по высоте твэлов.

Рис. 5. Размещение инструментированных твэлов в ТВС: а – схема ТВС, б – размещение ТЭП.

Для снижения потока тепла Q_2 (см. рис.6) в верхней части применены воздушные прослойки, как составные части гермоввода для измерительных линий датчиков. Устройство

успешно эксплуатировалось при давлении 1,7...12 МПа (нижняя граница ограничена условиями работы насоса ЦЭН-149) и расходе теплоносителя 0,006 – 2,7 кг/с.

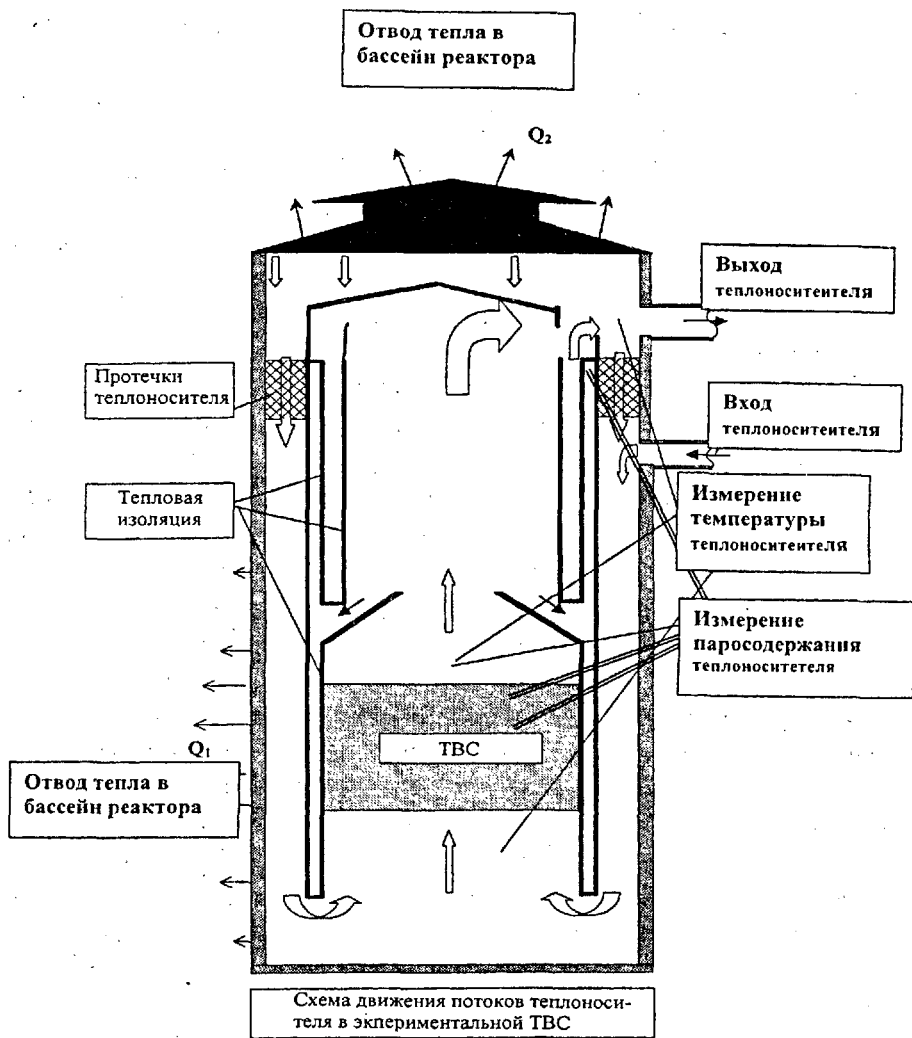


Рис. 6. Схема устройства и движения теплоносителя (Q_1 и Q_2 - потери тепла).

7. Для изучения поведения высоковыгоревших твэлов в условиях LOCA были использованы: разработанная в НИИАР технология изготовления так называемого рефабрикованного твэла (РФТ), который представляет собой фрагмент штатного твэла, а также технология дистанционной установки рефабрикованного твэла в ТВС (разработаны два варианта: 7-твэльная ТВС с центральным рефабрикованным твэлом и 19-ти твэльная ТВС с одним или тремя рефабрикованными твэлами) с последующей герметизацией подвески.

Технология рефабрикации включает аттестацию штатного твэла, отрезку фрагмента, извлечение части топлива, установку заглушек, оснащение твэла топливным ТЭП или датчиком давления, заполнение внутренней полости инертным газом и паспортизацию изделия.

8. Автором определен состав программных средств для расчетного сопровождения испытаний и выполнены в соавторстве исследования качества кодов. Подбор обогащения свежих твэлов и оценка мощности ЭТВС и штатных ТВС окружения в случае испытаний высоко выгоревшего топлива определяются с помощью кода MCU (РНЦ «Курчатовский институт»). Теплогидравлические расчеты выполняются с применением кодов КАНАЛ-97 (ОКБ «Гидропресс»), RELAP 5/MOD3.2 (INEL), КОРСАР (НИТИ и ОЦРК). Оценки радиационных последствий получены по коду MELCOR 1.8.2. (SNL). На стадии подготовки испытаний использовался код COBRA-TF (расчеты межячеечного тепло-массопереноса выполнены специалистами РНЦ «Курчатовский институт»).

Автором разработана и проверена на практике расчетно-экспериментальная методика определения энерговыделения в рефабрикованных и свежих твэлах по экспериментально определенной мощности ТВС и по данным γ -сканирования твэлов после испытания. Крайне важным является проведение как пред-, так и посттестовых расчетных исследований, что позволило оценить качество применяемых кодов (RELAP, КАНАЛ-97 и КОРСАР) по результатам их верификации на основе данных реакторных испытаний.

9. На основе эмпирических зависимостей степени деформации оболочек при различном давлении газа заполнения и температуре испытаний (получены специалистами ОКБ «Гидропресс») автором разработана расчетная процедура прогнозирования изменения диаметра оболочек и оценки времени разгерметизации при различном температурном режиме испытаний.

10. Автором внедрен способ регистрации момента импульсного выхода радионуклидов и определение их «вымывания» из объема облучательного устройства теплоносителем на

стадии повторного залива. Сущность метода заключается в установке двух датчиков на выходном трубопроводе и регистрации во времени мощности экспозиционной дозы (МЭД). Зная параметры теплоносителя и измеряя задержку в росте МЭД двух датчиков, оценивается время импульсного выхода радионуклидов при разгерметизации оболочки твэлов или при изменении агрегатного состояния теплоносителя на стадии повторного залива. Контролируя состав радионуклидов в теплоносителе пробоотборным и беспробоотборным способами, изучается миграция радионуклидов (распад радионуклидов и их осаждение на поверхностях контура при снижении температуры теплоносителя при охлаждении).

11. На основе результатов расчетного анализа автором показана безопасность испытаний, которая была подтверждена и практикой их выполнения. Проведены измерения на физической модели реактора и определены: распределение энерговыделения в твэлах 19-ти элементной ТВС, эффекты реактивности при изменении агрегатного состояния теплоносителя в канале и изменение распределения энерговыделения в этом случае.

Имели место случаи выхода из строя арматуры с истечением радиоактивного теплоносителя в помещения. Наличие гермооболочки в помещениях с оборудованием обеспечило безопасность испытаний, позволило локализовать радиоактивный теплоноситель и исключило выход радионуклидов за пределы помещения. Изложены проверенные на практике технологические приемы, исключающие недопустимый перегрев твэлов.

12. Полученный методический опыт подготовки и проведения испытаний рекомендован для дальнейшего развития исследований по безопасности ВВЭР на реакторе МИР.М1 (изучение тяжелых аварий на создаваемой установке ПВП-3).

В Приложении №1 «Петлевая установка ПВП-2 реактора МИР.М1: назначение, основные характеристики. Ее дооснащение и реконструкция для проведения испытаний LOCA. Обеспечение безопасности испытаний» рассмотрены характеристики и схема установки.

В приложении №2 «Методики определения основных параметров испытаний. Анализ погрешностей» рассмотрены методические вопросы определения основных параметров и их погрешности, в т.ч. мощности ТВС тремя способами, мощности твэлов, температуры оболочки ТЭП различной конструкции, особенности измерений водорода-продукта парциркулиевой реакции, состава и активности радионуклидов в теплоносителе.

В *третьей главе* (результативной) приведены программы и результаты экспериментов.

Реакторным испытаниям с фрагментами ТВС предшествовали стендовые эксперименты с изучением основных явлений (см. рис.1). В реакторном эксперименте воспроизводились номинальный режим, стадия аварии с потерей теплоносителя (режим с

частичным осушением или «повторный залив») и режим с повторным смачиванием (QUENCH-режим). Режимы испытаний и полученные результаты приведены в таблице 1.

Испытания необлученных (свежих) твэлов проведены (см. таблицу 1):

- при повышенном давлении теплоносителя 12 МПа (сжимающие оболочку твэлов усилия) –испытания МТ-1 без разгерметизации твэлов и МТ-2 с разрушением твэлов;
- при пониженном давлении теплоносителя (растягивающие усилия) - испытания МТ-3 без разгерметизации твэлов и БТ-1 с разгерметизацией твэлов.

Проведены сравнительные испытания необлученных (свежих) и высоковыгоревших твэлов (МТ-5 с разгерметизацией твэлов и МТ-5П без разгерметизации твэлов), а также испытание с интерметаллидным свежим и выгоревшим топливом (МТ-6). Результаты испытаний с интерметаллидным топливом приведены для выявления особенностей переходных режимов.

Таблица 1 .

Основные параметры и результаты экспериментов

«Малая течь» (SB LOCA) и «МПА.2-я стадия» (LB LOCA)

Эксперимент	Состав ТВС	Давление теплоносителя, температура оболочки	Выдержка, время	Состояние твэлов	Полученные экспериментальные данные
МТ-1	18 свежих твэлов ВВЭР-1000. Дистанционирующие решетки (ДР) из нержавеющей стали (НС)	12 МПа 530+950°С	72 мин.	герметичные	1. Состояние твэлов, решеток, геометрические размеры, формоизменение. 2. Окисление оболочки. 3. Изменение структуры материала оболочки. 4. Механические свойства оболочки. 5. Содержание водорода в теплоносителе и в оболочке.
МТ-2	19 свежих твэлов ВВЭР-1000. ДР из НС.	12 МПа 800+1200°С	100 мин. (3 мин. при 1200°С)	негерм., разруш. и выход радионуклидов	1. Вид разрушения. 2. Изменение геометрических размеров твэлов и решеток. 3. Окисление оболочки,

Эксперимент	Состав ТВС	Давление теплоносителя, температура оболочки	Выдержка, время	Состояние твэлов	Полученные экспериментальные данные
				в контур	наличие трещин. 4.Содержание водорода в теплоносителе .
МТ-3	19 твэлов ВВЭР-1000 без выгорания. ДР из НС.	4 МПа 650+730°C	25 мин.	герметичные, формоизменения незначит. в виде вздутия	1. Состояние твэлов, решеток. Геометрические размеры. 2.Окисление оболочки. 3.Изменение структуры материала оболочки. 4. Механические свойства оболочки и топлива. 5. Содержание водорода в теплоносителе и в оболочке.
БТ-1 Ист. МПА ВВЭР	19 свежих твэлов ВВЭР-1000. ДР из НС.	1,7 МПа 785+825°C	60 мин. (2 мин. при 825°C)	*) вздутия оболочек	1. Общее состояние твэлов, решеток. 2. Формоизменения - (вздутия) при ΔР на оболочке макс.=3,5... 4 МПа.
МТ-5П	6 свежих твэлов ВВЭР-440; 1 твэл с выгоранием ~56 МВтсут/кгU ДР из из Zr-сплава.	6 МПа 700+930°C	35 мин.	герметичные, формоизменения незначит.	Сравнит. испытания 1.Изменение геометрических размеров. 2.Окисление оболочки, состояние дист. решеток. 3.Изменение структуры материала оболочки. 4.Механические свойства оболочки. 5.Содержание водорода в теплоносителе и в оболочке.
МТ-5	6 свежих	4,9 МПа	40 мин.	негер-	Сравнит. испытания

Эксперимент	Состав ТВС	Давление теплоносителя, температура оболочки	Выдержка, время	Состояние твэлов	Полученные экспериментальные данные
	твэлов ВВЭР-440; 1 твэл с выгоранием ~60МВт.сут./кгU. ДР из Zr-сплава	750+1250°C	(2 мин. при $t > 1100^\circ\text{C}$)	метичн. Смятие свежих, вздутие выгор. твэлов	1. Вид разрушения. 2. Изменение геометрических размеров. 3. Окисление оболочки. 4. Состояние решеток.
MT-6**	18 свежих полномасштабных твэлов и центральный выгоревший твэл из реактора типа АБВ. Интерметаллидное топливо. Решетки из нерж. стали.	2 МПа 580-860 °C	33 мин.	Герм., Сжатие оболочек свежих твэлов, вздутые выгоревшего твэла.	1. Вид и состояние твэлов. 2. Изменение геометрических размеров. 3. Состояние топлива и оболочки. 4. Сравнительный анализ поведения свежего и выгоревшего топлива. 5. Определение температуры сохранения герметичности. 6. Получение сведений для верификации программ
<p>Примечание: *)- системой контроля радиационной безопасности не зарегистрирована разгерметизация твэлов, разгерметизация определена при постстесовых исследованиях.</p> <p>**) - различие твэлов только в виде топлива, оболочки и ДР идентичны с твэлами и ДР ВВЭР.</p>					

В четвертой главе приведены результаты анализа режимов испытаний и данных постстесовых исследований ТВС, твэлов и дистанционирующих элементов, а также данных зарубежных реакторных испытаний. Приведены результаты постстесового расчетного

анализа режимов испытаний и выхода продуктов деления из топливной композиции под оболочку и в теплоноситель после разгерметизации оболочки. Сделаны выводы по безопасности топлива и предложены рекомендации по применению результатов как для разработчиков перспективных реакторов, так и для разработчиков кодов, применяемых для обоснования безопасности реакторов ВВЭР.

Теплогидравлический анализ режимов испытаний.

Установлено значительное влияние режимов испытаний (температуры твэлов, давления теплоносителя и др.) на состояние твэлов.

Начальный момент осушения. Устойчивый режим с частичным осушением оболочек твэлов реализуется при граничной температуре наружной поверхности оболочки 490...570 °С (таблица 2), что согласуется с рекомендацией в обзорной работе ФЭИ (Кириллов П.Л. и др., ТЕПЛОФИЗИКА-90,1991г.): $T_{\text{ф}} = 530 \pm 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ «в широком диапазоне изменения режимных параметров». Итак, подтверждена рекомендация ФЭИ по граничной температуре устойчивого режима с частичным осушением твэлов. Менее этой температуры реализуется неустойчивый режим с колебанием температуры от насыщения до $T_{\text{ф}}$ (рис.7).

Таблица 2

Значения $T_{\text{ф}}$ по результатам испытаний LOCA

Испытание	МТ-1	МТ-3	БТ-1	МТ-5П	МТ-6
Давление, МПа	11,5	3,9	1,7	5,6	2,3
$T_{\text{ф}}$, °С	510-540	530-540	490-500	570	510
Примечание: массовая скорость теплоносителя 6...30 кг/(м ² ·с); тепловая нагрузка в зоне осушения 15...40 Вт/см					

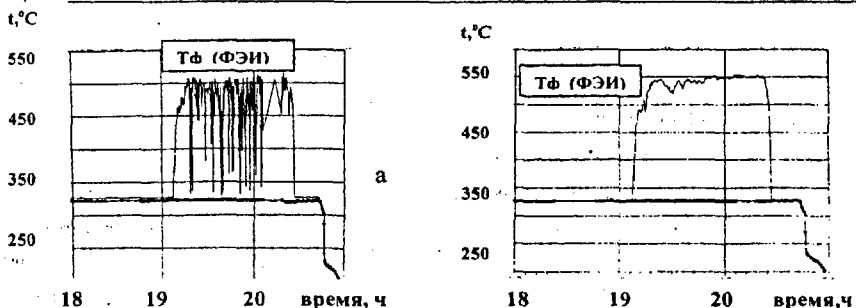


Рис. 7. Показания ТЭП: а - в оболочке твэла №17 (неустойчивый режим); б- в оболочке твэла №15 (устойчивый режим), нижние зависимости – показания ТЭП в зоне развитого кипения; указан реальный отсчет времени 11.12.92. в испытании МТ-1.

Стадия испытаний с устойчивым режимом частичного осушения ($T > T_f$).

В режиме с частичным осушением твэлов установлено существенное влияние межячейкового теплопереноса. Явление относится к разряду важных для безопасности, так как учет этого явления позволяет снизить консервативность расчета.

При использовании топлива штатного обогащения энерговыделение угловых твэлов наружного ряда в 19-элементном фрагменте отличается от энерговыделения центрального твэла в 1,3 раза, что может привести к значительной неравномерности распределения температуры по сечению ТВС. Использование паро-жидкостного охлаждения (жидкость внизу, пар сверху, дисперсный режим охлаждения верхней части ТВС), на первый взгляд, может привести к существенному увеличению указанной неравномерности температуры, так как приращение энтальпии теплоносителя будет в 3 раза больше, чем при охлаждении только паром (при одинаковой температуре теплоносителя на входе и выходе из ТВС). При указанном различии энерговыделений без учета межячейкового тепло- и массопереноса расхождение в температуре оболочек должно быть не менее 300 °С, что существенно больше, чем это зарегистрировано в эксперименте (до 50 °С). Данный факт объясняется тем, что в теплонапряженных ячейках больше генерируется пара (приток массы). Это обеспечивает более интенсивное охлаждение осушенной части твэла данной ячейки. Кроме прямых измерений температуры оболочек, этот факт подтверждается расположением границы раздела фаз по твэлам. По результатам посттестовых исследований твэлов она для всех ячеек расположена на одном уровне, что подтверждает интенсивное перемешивание теплоносителя. Кроме того, рассмотрены данные экспериментов НИИАР начала 70-х годов (Гаврилин А.И. и др.) с моделью двух ячеек различной мощности, также подтверждающие тепло-массоперенос в режиме с кипением теплоносителя в ячейках. Сечение рабочего участка в этих испытаниях имело форму гантели с перемычкой для массопереноса между ячейками различных размеров. Итак, существенен механизм массопереноса между ячейками, приводящий к «самоусреднению» температуры по сечению ТВС при наличии неравномерности энерговыделения по сечению.

Предлагаемый в работе учет межячейкового тепло-массопереноса путем «подгонки» в расчете расхода по ячейкам 19-ти элементного фрагмента с сохранением условия равенства температуры теплоносителя по высоте ячеек и неизменной геометрии привел к снижению расчетных значений максимальной температуры оболочек на 140 °С (оценка предельного уровня температуры – 800 °С). В расчете получено распределение, подобное экспериментальному. Поэтому практический интерес представляет корректный учет межячейкового тепло-массопереноса как эффективная мера по снижению излишнего

консерватизма при оценке температуры твэлов в режимах с частичным осушением. Целесообразность этих разработок не вызывает сомнения, так как это позволяет исключить «излишний» консерватизм в расчетах по безопасности. В ТВС ВВЭР-1000 имеются как «холодные» ячейки (ячейки с пеллами), так и межкассетные прослойки, что может приводить к снижению температуры теплонапряженных ячеек и к меньшим последствиям инцидента.

Принятый в испытаниях дисперсный (паро-капельный) режим охлаждения верхней части ТВС в большей степени соответствует условиям аварий с частичным осушением активной зоны и второй стадии LB LOCA – повторному заливу. Действительно. целесообразны испытания с паро-капельным режимом охлаждения, подобные стендовым испытаниям, выполненным в КФК (FEBA и РЕВЕКА с имитаторами, имеющими различное термосопротивление, 80-е годы), и «Повторный залив» (ФЭИ, 90-е годы). В стендовых испытаниях с частичным осушением ТВС в режиме «малая течь» (работы Гордона Б.Г., Балунова Б.Ф., Безрукова Ю.А. и др., 80-е годы), как и в выше перечисленных стендовых испытаниях, установлено влияние капель влаги на режимы охлаждения. Поэтому выбранный режим течения теплоносителя в фрагменте штатной ТВС позволил провести испытания в реалистичных условиях. Это существенно при оценке работоспособности дистанционирующих решеток и прилегающей к ним части твэлов. В дисперсном режиме рассматриваемая часть ТВС с ДР имеет температуру ниже, чем остальные участки ТВС. Поэтому реализуется щадящий режим для решеток и смежной к ним части твэлов.

Результаты испытаний важны для оценки разбираемости активной зоны после аварии и оценки транспортабельности ТВС. Выявленные автором из анализа стендовых экспериментов особенности течения теплоносителя и охлаждения твэлов подтверждены в реакторных испытаниях. В области дистанционирующих решеток существенно меньше формоизменения твэлов. Дистанционирующие элементы обеспечили транспортабельность ТВС даже с разрушенными твэлами (МТ-2).

Посттестовый расчетный анализ режимов испытаний выполнен автором с использованием кодов КАНАЛ (ОКБ «Гидропресс»), КОРСАР (НИТИ, ОЦПК) и RELAP (INEL). Расход теплоносителя и мощность ТВС были скорректированы в пределах погрешностей их определения так, чтобы расчетные и экспериментальные значения температуры теплоносителя на выходе из ЭТВС совпадали. Подтверждена консервативность кодов (по определению границы раздела фаз и зоны осушения ТВС и температуры оболочки осушенной части ТВС). По коду КАНАЛ в области закризисного теплообмена различие расчетных и экспериментальных значений температуры оболочки не превышает 15%, что

существенно меньше, чем расчетная погрешность кода, установленная в процессе его верификации и аттестации (до $\pm 30\%$).

Установлены высокие экспериментальные значения теплоотдачи к теплоносителю (α) в осушенной части вблизи границы раздела фаз ($\leq 0,05$ м), которые примерно в 2 раза выше, чем для участков ТВС, расположенных выше рассматриваемой области ($\Delta Z = 0,2 \dots 0,4$ м от границы раздела фаз). Вследствие ограниченности размеров ТВС зона с осушением твэлов составляет $0,4 \dots 0,6$ м и именно в этой области вклад в теплообмен вносит испарение капель и их непосредственное участие в охлаждении решеток и поверхности оболочек. На основе анализа литературных данных определено ограничение по размерам ячеек, в которых указанный эффект не будет проявляться (эффект «узкого» зазора, в котором паро-капельный режим охлаждения невозможен, если размеры капель 2-3 мм более ширины зазора). Из-за вероятного перераспределения капель по ячейкам и соответственно уменьшения α в узких прослойках возможно местное увеличение температуры (исключение в теплообмене капель приводит к снижению α на 30 % и локальному перегреву). Эффект важен для анализа 2-й стадии МПА ВВЭР с образованием локальных вздутий оболочек и их перегревов.

Особенности QUENCH – режима. Изменение средней температуры оболочки в стадии повторного залива характеризуется двумя зависимостями: медленным снижением температуры до некоторого значения (границной температуры ϑ) в процессе охлаждения в рассмотренном дисперсном режиме течения теплоносителя и резким снижением до температуры насыщения (T_s) в результате смены механизма теплосъема с пленочного кипения на пузырьковый (рис.8). Следует отметить различие физических величин ϑ и минимальной температуры пленочного кипения ($T_{пк}$), ниже значения которой реализуется пузырьковое кипение: $\vartheta \geq T_{пк}$.

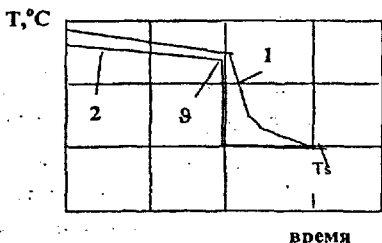


Рис.8. Характерный пример изменения температуры сердечника (1) и оболочки (2) в режиме смачивания оболочки

Стадия резкого снижения температуры - это **QUENCH** – режим, закалка или повторное смачивание поверхности. Амплитуда термошока на этой стадии, определяемая как разность температуры в режиме резкого снижения температуры- $A = \vartheta - T_s$, крайне важна как

закрывающее соотношение в кодах, так и для анализа термостойкости твэлов. В главе показано различие экспериментальных и расчетных значений амплитуды термошока.

В реакторных и стендовых испытаниях с пучками имитаторов и фрагментами ТВС реализуется набор значений Θ (наличие нескольких фронтов смачивания, влияние дистанционирующих решеток (ДР) и т.п.). Имеется различие и в значениях Θ для твэлов с разной теплопроводностью и термосопротивлением между оболочкой и сердечником (R_k), что было выявлено сравнением результатов испытаний твэлов с диоксидным и интерметаллидным топливом, а также данных стендовых испытаний РЕВЕКА в КФК (рис.9).

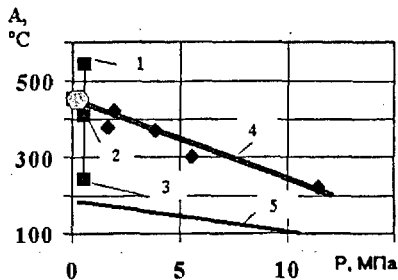


Рис.9. Амплитуда термошока в зависимости от давления: \circ - из диссертации Гугучкина В.В., 1997г.; \blacksquare - данные РЕВЕКА: 1- за ДР, блокада 55-60 %; 2- между ДР, блокада 55-60 %; 3 – ячейка без деформации оболочки; \blacklozenge - реакторные испытания; 4 – $A=432-19 P$; 5- $A_{\text{трап}}=180(1-P/P_{\text{крит}})$

Приведенные на рис. 9 максимальные значения амплитуды термошока, полученные в испытаниях со штатным топливом, рекомендуются в качестве закрывающего соотношения в кодах для определения термомеханических напряжений в оболочках твэлов в QUENCH – режиме (зависимость 4 на рис. 9). Эти значения амплитуды значительно отличаются от используемых в расчетах. Так, в аттестованной версии ТРАП применяется зависимость 5 на рис.9. Видна интенсификация теплообмена в области ДР (см. значения 1 и 2 на рис. 9), а также влияние степени деформирования оболочки на значение амплитуды термошока.

Разработана процедура определения теплофизических параметров твэла в QUENCH-режиме. Момент смачивания оболочки характеризуется резкой интенсификацией теплообмена (переход от пленочного к пузырьковому кипению). В дальнейшем при практически постоянной температуре оболочки реализуется при охлаждении сердечника известный регулярный режим первого рода: $\Delta T_{\text{ц}} = \Delta T_{\text{ц}}(0) \cdot \exp(-\gamma t)$, где γ – постоянная; $\Delta T_{\text{ц}}$, $\Delta T_{\text{ц}}(0)$ – приращение среднеобъемной температуры топлива относительно конечного стационарного значения – T_s , см. рис. 8. Регулярный режим охлаждения таблеток устанавливается после 2...3 с от момента смачивания. Для термометрированных твэлов значения γ равны: $\gamma = 0,17 \text{ с}^{-1}$ – для БТ-1, $\gamma \geq 0,5 \text{ с}^{-1}$ для МТ-3.

По выше определенным значениям γ оценен коэффициент теплопередачи α , между

сердечником и оболочкой. Значения α_k соответствуют расчетным, полученным для измеренных после испытаний размеров оболочки, если учесть изменения размеров оболочек, растрескивание и перемещение фрагментов топлива к оболочке. Значения α_k близки к расчетным данным, полученным по ранее определенным экспериментальным зависимостям (испытания на реакторе СМ в НИИАР, 1973-1987 гг.).

Состояние фрагментов ТВС ВВЭР после реакторных испытаний LOCA.

Все фрагменты, кроме МТ-2, были разобраны в защитной камере, и твэлы извлечены из дистанционирующих решеток. Твэлы МТ-2 разгерметизировались на стадии выдержки и разрушились на стадии повторного смачивания, поэтому исследования проводились на горизонтальных шлифах после заливки фрагмента компаундом. Для всех твэлов, в которых давление газа под оболочкой было меньше, чем давление в контуре петли, в зоне осушения ($T > 900$ °С) зафиксировано уменьшение диаметра оболочек свежих твэлов до полного исчезновения исходного диаметрального зазора между топливом и оболочкой и продавливание оболочки между таблетками (формирование «антибамбука»), что может влиять на деформацию оболочки в последующем QUENCH-режиме (рис. 10-12).

Формирование при высокотемпературной выдержке указанного состояния способствует разрушению охрупченных оболочек твэлов на стадии повторного смачивания (МТ-5 и МТ-2, рис.13). В рефабрикованных твэлах (РФТ в МТ-5П и МТ-5) отсутствовал зазор между таблетками и оболочкой, и не было возможности образования продавливания оболочки в стыки между таблетками (см. рис.12). Для твэла фрагмента МТ-3, где в верхней части твэла перепад давления составлял 1,5...2 МПа и направлен от центра твэла, зафиксировано увеличение диаметра оболочки до 70 мкм. Увеличение диаметра твэлов установлено у РФТ МТ-5 (см. рис.12) и твэлов БТ-1 (увеличение поперечного сечения центрального твэла, твэлов среднего ряда и наружного ряда на 25-42 %).

Не зарегистрировано взаимодействие дистанционирующих решеток (нержавеющая сталь) с материалом оболочки даже в наиболее «высокотемпературном» эксперименте МТ-2. Состояние циркониевых решеток при температуре оболочек до 930 °С признано удовлетворительным (см. рис.10). Анализом температурных условий дистанционирующих элементов установлено, что они имеют более низкую температуру, чем смежные участки оболочки. Этот факт объясняется эффективным охлаждением решеток и прилегающих участков твэла при дисперсном режиме течения теплоносителя и важен для анализа извлекаемости ТВС из активной зоны и их дальнейшей транспортабельности.

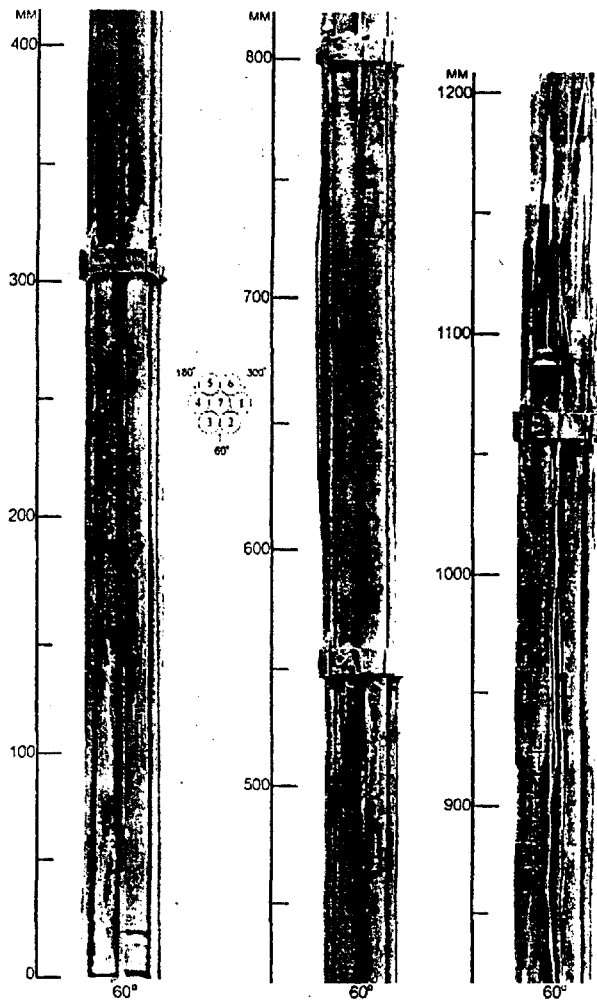
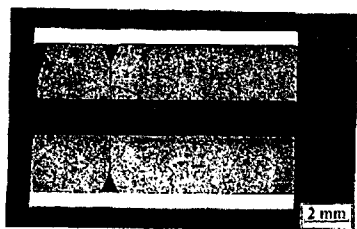


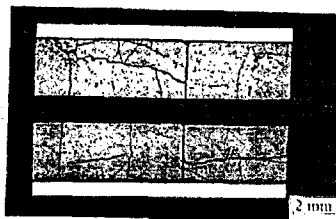
Рис.10. Общий вид пучка твэлов и циркониевых решеток ТВС МТ-5П.

В температурном диапазоне 850+950°C толщина окисной пленки на поверхности оболочки не превышала 20 мкм для твэлов со «свежим» и выгоревшим топливом. Нет особенностей в окислении оболочек выгоревшего твэла.



810 мм

Свежий твэл (810мм)



810 мм

Выгоревший твэл (810 мм)

Рис.11. Общий вид фрагментов свежего и выгоревшего твэлов ТВС МТ-5П (участок свежего твэла в области решетки (см. рис. 10), т.е. в зоне интенсификации теплообмена, поэтому нет продавливания материала оболочки в стыки между таблетками).



свежие твэлы (МТ-5)

Состояние с продавливанием оболочки



выгоревший твэл (МТ-5)

Вздутие и разгерметизация высоко
выгоревшего твэла

Рис. 12. Общий вид фрагментов свежих твэлов и РФТ (в области вздутия) ТВС МТ-5.

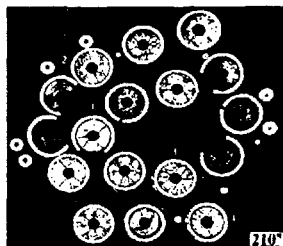
Установлено увеличение содержания водорода в оболочках твэлов на участке осушения - ($1 \cdot 10^{-2}$ - $2 \cdot 10^{-2}$ % масс., МТ-5П). Содержание водорода в оболочке в нижней, залитой водой, части оболочки не превышало $5 \cdot 10^{-3}$ % масс.

Механические характеристики оболочек (испытания до 750°C), измеренные на кольцевых образцах, остались на исходном уровне (МТ-3). Предварительная выдержка при

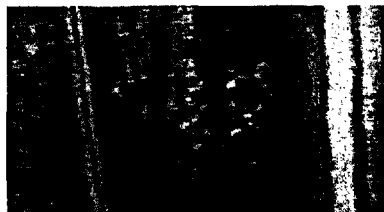
температуре свыше 900 °С приводит к меньшей деформации оболочек при их нагружении до разгерметизации.

Для условий испытаний МТ-5П указанное изменение практически идентично для свежего и выгоревшего твэла и не было критичным (твэлы герметичны). Структура материала в зоне осушения также практически идентична для «свежего» и рефабрикованных твэлов (рис.14).

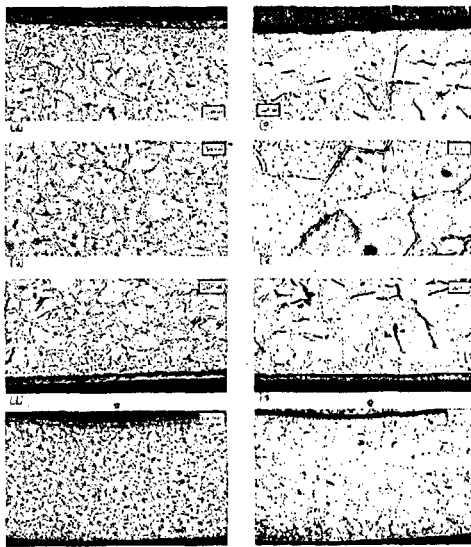
В оболочке твэлов из фрагмента МТ-2 произошло значительное увеличение размера зерна, разрушение оболочек носит хрупкий характер. Установлена зависимость относительного числа разрушенных оболочек в сечении от степени их окисления (определена металлографическим анализом). Процесс начинается при локальной глубине окисления 15 ± 2 %. При 35% окислении оболочки всех твэлов дефектны.



Поперечное сечение



Фрагмент твэла



а

б

Рис.14. Микроструктура оболочек твэлов 7- РФТ(а) и свежего (б) на отметке 745 мм

Рис.13. Разрушение оболочек в МТ-2.

Радиационные последствия (испытания МТ-2, МТ-5)

Определены состав газа под оболочкой свежего и выгоревшего твэлов (таблица3), а также активность радионуклидов в контуре петли при разрушении свежих твэлов МТ-2 (таблица 4, состояние твэлов приведено на рис. 13) и твэлов МТ-5 (см. рис:12).

Таблица 3

Состав газа под оболочкой высоко выгоревшего твэла (В=56 МВтсут/кгU, МТ-5П)

Твэл	Объемная доля, %						
	He	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Kr	Xe
«Свежий»	99,86	<0,12	<0,02	<0,003	<0,001	-	-
Выгоревший твэл МТ-5П	69,97	<0,39	<0,08	<0,003	<0,001	2,58	26,98

Примечание: Выход РБГ из топлива оценен в 7...9 % (из области с температурой 850 ≤ T ≤ 1050 °С, выдержка τ ≈ 2 мин).

Таблица 4

Исходная масса и выход радионуклидов, удельная активность теплоносителя в МТ-2

Дата отбора проб	16.04.94, 18:20, через 1 час после регистрации роста МЭД (рис.16, τ=75...80 мин, 3 пробы)*			18.04.94, 9:30, τ=2350 мин, три пробы*)	
Радионуклид	Активность пробы, МБк/л (Ки/л)		Погрешность опр. активн., %	Выход отн.ед.	Активность, МБк/л (Ки/л) Пересчет на 18.04.9:30
	16.04 17:20 (пересчет на момент разгерметизации)	18.04 10:42 (измерение)			
Xe-133	31 (8,5·10 ⁻³)	25 (6,8·10 ⁻⁴)	26,5	10 ⁻⁴	12 (3,1·10 ⁻⁴)
Xe-135	82 (2,2·10 ⁻³)	3,6 (9,8·10 ⁻³)	6,8	7,6·10 ⁻⁵	-
Sr-91	30 (8,0·10 ⁻³)	1,5 (4,2·10 ⁻³)	6,1	2,5·10 ⁻³	1,4 (3,7·10 ⁻³)
Ba-140	1,3 (3,5·10 ⁻³)	1,2 (3,2·10 ⁻³)	15,2	5,8·10 ⁻⁶	-
I-131	63 (1,7·10 ⁻³)	54 (1,5·10 ⁻³)	4,8	4,4·10 ⁻⁴	70 (1,9·10 ⁻³)
I-132	-	-	-	-	196 (5,3·10 ⁻³)
I-133	485 (1,3·10 ⁻²)	124 (3,4·10 ⁻³)	4,7	3,3·10 ⁻⁴	155 (4,2·10 ⁻³)
I-135	326 (8,8·10 ⁻³)	4,5 (1,2·10 ⁻⁴)	4,7	3,1·10 ⁻⁴	6 (1,6·10 ⁻⁴)
Mo-99	1,8 (4,9·10 ⁻³)	1,2 (3,2·10 ⁻³)	18,6	2,5·10 ⁻⁶	4 (1,2·10 ⁻⁴)
La-140	5,9 (1,6·10 ⁻⁴)	2,8 (7,7·10 ⁻³)	5,1	6,2·10 ⁻³	-
Сумма	1026**)/(2,8±0,2)·10 ⁻²	220/(6,0±0,4)·10 ⁻³			444/ (1,2±0,6)·10 ⁻²

Примечание:*) пробы отличаются временем отбора, первые три выдерживались до измерения из-за высокой исходной активности; **)- активность теплоносителя на момент разгерметизации выше на 10...15% за счет короткоживущих изотопов криптона, ксенона и йода (не зарегистрированы при измерении)

Автором выполнен анализ данных по выходу РБГ из выгоревших твэлов ВВЭР и PWR в режиме LOCA :

- с отжигом твэлов ВВЭР с выгоранием топлива до 60 МВтсут/ кг U (НИИАР);
- с отжигом твэлов PWR с выгоранием топлива PWR 38...55 МВтсут/ кгU (испытания VERCOR, Франция);
- реакторные испытания твэлов PWR с выгоранием 20 и 36 МВтсут/кг U на петлевой установке реактора FR-2 (КФК, Германия) и с выгоранием 50 МВтсут/кг U на петлевой установке реактора Siloe (испытание FLASH 5, Франция).

Установлено существенное влияние скорости нагрева топлива на выход РБГ. Полученные в настоящей работе результаты (МТ-5П) согласуются с данными экспериментов с высокой скоростью нагрева, а именно: с результатами «отжиговых» экспериментов НИИАР ($B=60 \text{ MBт} \cdot \text{сут} / \text{U кг U}$, скорость нагрева $13 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C/s}$, выход до 10 %), с данными испытаний на реакторе FR-2 с выгоранием топлива $36 \text{ MBт} \cdot \text{сут}/\text{кг U}$, в которых в подобном режиме LOCA (скорость нагрева до $8 \text{ }^\circ\text{C/e}$) выход РБГ составлял до 6 % и был обусловлен образованием микротрещин в топливе. В испытаниях FLASH 5 с ростом температуры в течение 40 с с 200 до $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью $20 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C/s}$ выход РБГ составлял до 6 %. При существенно меньшей скорости нагрева ($0,6 \text{ }^\circ\text{C/s}$) выход РБГ в рассматриваемом интервале температуры менее 0,1% (VERCOR). Показано, что режим испытаний высоковыгоревшего топлива в МТ-5П как по скорости нагрева топлива ($2 \dots 3 \text{ }^\circ\text{C/s}$), так и по длительности (до 500 с) подобен режиму второй стадии МПИА ВВЭР-1000.

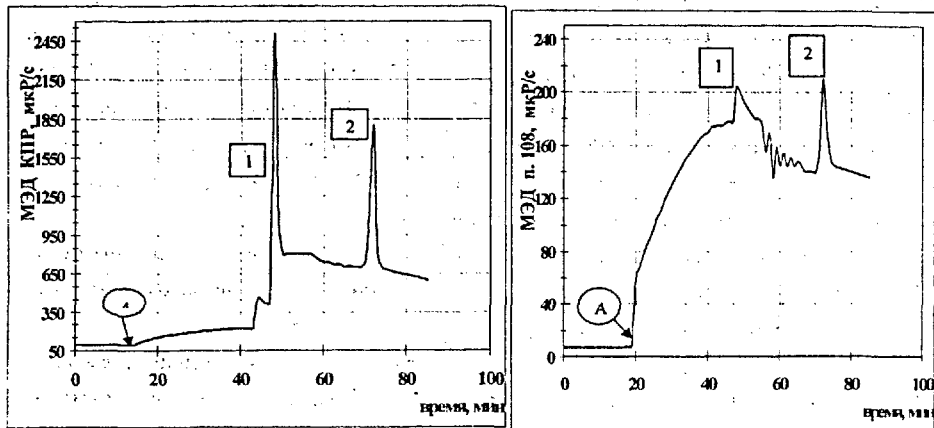
В испытании МТ-2 активность радионуклидов в теплоносителе не превысила 370 000 MBк (10Ки). Рост мощности экспозиционной дозы от трубопроводов ($\tau=15 \text{ мин.}$, рис.15 а и $\tau=20 \text{ мин.}$, рис.15 б) соответствует стадии *QUENCH* – режима.

Зарегистрированы следующие импульсы: первый - при увеличении расхода с 0,04 до 0,3 кг/с, второй – при включении пробоотбора. Имело место вымывание изотопов йода «горячим» теплоносителем (в течение $\tau=0 \dots 70 \text{ мин.}$ температура теплоносителя на выходе из ТВС снижалась с 400 до $190 \text{ }^\circ\text{C}$). Этот вывод подтвержден анализом изменения МЭД от трубопроводов (см. рис.15) и состава проб, отобранных с задержкой во времени (см. таблицу 4).

Установлены особенности в выходе радионуклидов из топлива высоко выгоревших твэлов под оболочку твэла (см. таблицу 3, данные для твэла, сохранившего герметичность) и по выходу радионуклидов в теплоноситель (испытание МТ-5). Основной вклад в активность теплоносителя вносят инертные радиоактивные газы и изотопы йода и цезия (МТ-5). При испытании МТ-5 при разгерметизации оболочки выход радионуклидов из выгоревшего твэла (температура оболочки $800 \text{--} 850 \text{ }^\circ\text{C}$) не был зарегистрирован из-за его незначительности, а разгерметизация установлена только при посттестовых исследованиях (по окислению внутренней поверхности оболочки). При последующем нагреве до $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ зафиксирован выход РБГ и изотопов йода и цезия. По выходу в теплоноситель изотопов йода и цезия испытания подобны эксперименту FLASH 5 (Франция). Следовательно, в рассматриваемых условиях выход из свежего топлива осколочных газов и других продуктов деления под оболочку твэла и в теплоноситель не велик. Особенности высоко выгоревшего топлива

проявляются в повышенном выходе РБГ и стабильных газов, изотопов йода и ранее накопленных изотопов цезия (выход до 1 %).

После испытаний путем многократной замены теплоносителя в контуре удалось существенно (в 1000 раз) снизить концентрацию радионуклидов в контуре. Дезактивация контура не проводилась.



а

б

Рис.15. Испытание МТ-2. Стадия снижения мощности и повторного залива. Показания датчика мощности экспозиционной дозы от трубопровода около канала (а) и в помещении ПУ (б): А – рост МЭД из-за разрушения твэлов в QUENCH-режиме; 1 и 2 – импульсы из-за увеличения расхода и гидродинамического возмущения при отборе проб.

Генерация и выход в контур водорода.

При температуре оболочки не более 950°C количество водорода в теплоносителе составляет до $15 \text{ нсм}^3/\text{кг}$ (испытания МТ-1, МТ-3, МТ-5П; длительность испытаний приведена в таблице 1, слой оксида на оболочке – до 20 мкм). Количество водорода в теплоносителе, измеренное при «жестком» испытании МТ-2, было максимальным и составило $80 \text{ нсм}^3/\text{кг}$. В этом испытании (МТ-2) масса водорода в теплоносителе оценена $3 \pm 1,5 \text{ г}$. Происхождение водорода – пароциркониевая реакция, что подтвердили результаты посттестовых исследований.

Опыт испытаний подтверждает безопасность принятой технологии обращения с теплоносителем, содержащим растворенный водород. Газовая среда из газового

компенсатора сбрасывается в специальные емкости с разбавлением водорода азотом. После выдержки осуществляется сброс через систему вентцентра.

Крайне важными для оценки разбираемости активной зоны являются сведения о транспортабельности экспериментальных ТВС, их разбираемости в условиях защитной камеры. Имеет место эффект «пучка», когда фрагмент транспортабелен, разбирается на отдельные элементы, но при этом локальные участки отдельных элементов хрупкие (МТ-1 и МТ-5). Выводы, сделанные по результатам исследований только локального охрупченного участка, могут быть крайне консервативными. Для снятия излишнего консерватизма полезным представляется анализ состояния ТВС как изделия в целом. Именно характеристики ТВС как изделия важны для разбираемости активной зоны после аварии.

В рамках концепции разумного консерватизма и на основе анализа полученных экспериментальных результатов с фрагментами ТВС ВВЭР и литературных данных автором разработано предложение по целесообразности введения дополнительного критерия по разбираемости активной зоны после аварии, который должен основываться не только на степени локального окисления оболочки (принятый критерий), а в большей степени на состоянии ТВС в целом как изделия. Как установлено в выполненных реакторных экспериментах с ТВС, отдельные твэлы были охрупчены, но ТВС сохранили механические характеристики для выполнения технологических (резка устройства, извлечение ЭТВС) и транспортных операций (перегрузка из реактора в бассейн выдержки, в камеру для отрезки ЭТВС, перевозка в контейнере, перегрузка в камеру для исследований). Выявлена интенсификация охлаждения дистанционирующих решеток, что положительно влияет на сохранение их механических характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По исследовательской проблеме «Безопасность активных зон ВВЭР» завершен комплекс взаимосвязанных тем исследований, проектов и испытаний, включающий разработку и внедрение на реакторе МИР научно-обоснованных и проверенных на практике решений по расширению экспериментальных возможностей реактора для проведения представительных исследований по безопасности активных зон ВВЭР и получения данных о поведении необлученных и выгоревших твэлов в режимах проектных аварий с потерей теплоносителя.

2. Разработаны методики испытаний, проект реконструкции петлевой установки ПВП-2, конструкции облучательных устройств, обоснована безопасность испытаний; проведено дооснащение установки, впервые выполнены реакторные испытания с отечественным топливом и получены значимые для практики результаты по проблеме «Безопасность активных зон ВВЭР». Проведены сравнительные испытания свежих и выгоревших твэлов

(выгорание 55...60 МВтсут/кг U) . Уровень выгорания соответствует внедряемому перспективному четырехгодичному топливному циклу ВВЭР. Результаты получены в рамках договорных работ и востребованы разработчиками твэлов и ТВС, а также изготовителями твэлов.

3. Сформировано расчетное сопровождение испытаний, которое необходимо как для прогнозирования режимов испытаний, так и для оценки качества используемых кодов. Пред- и посттестовыми теплогидравлическими расчетами подтверждена консервативность кодов КАНАЛ-97 (из комплекса ТРАП, ОКБ «Гидропресс»), RELAP5/MOD3.2 (INEL) и КОРСАР (ОЦРК, НИТИ). Опыт применения программ и рекомендации по их совершенствованию доступны для разработчиков и пользователей кодов. Результаты испытаний использованы для верификации кода RELAP5/MOD3.2 применительно к расчетам по безопасности ВВЭР.

4. В результате анализа теплогидравлических условий испытаний натурального фрагмента ТВС ВВЭР в модельных режимах с частичным осушением ТВС разработаны следующие рекомендации для снижения степени консерватизма в расчетах температуры твэлов.

Целесообразен учет:

а) граничной температуры оболочки в устойчивом режиме с частичным осушением твэлов $T_{\text{ф}}=530\pm 30$ °С в качестве замыкающего соотношения;

б) межячейкового тепло-массопереноса, приводящего к снижению неравномерности температурного поля по сечению ТВС в режимах с частичным осушением активной зоны и соответственно максимальной температуры оболочки и топлива, а также

в) экспериментальных значений амплитуды термошока для твэлов в режиме повторного смачивания (режим закалки, QUENCH-режим).

Подтверждены более высокие экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи (в сравнении с расчетными), образование фронта смачивания на решетке и ее интенсифицирующая роль в локальном охлаждении оболочки.

5. Для большинства проектных аварийных режимов, которые характеризуются кратковременной температурой оболочек твэлов 350...700°С, подтверждена безопасность твэлов. Результаты использованы при обосновании работоспособности (живучести) твэлов в аварийном режиме МПА ВВЭР-440 первого поколения и для установления проектных пределов твэлов в авариях на реакторе ВК-50 и рекомендуются для создаваемых ВВЭР с пониженной удельной теплонпряженностью активной зоны (ВВЭР-1500).

6. Установлено, что в интервале температуры 900...1200 °С *повышенное давление теплоносителя* приводит к продавливанию оболочек в месте стыка таблеток свежих твэлов, что в дальнейшем на стадии повторного смачивания может быть причиной поперечных

разрывов оболочек части твэлов. Твэлы в «жестких» испытаниях» (≈ 1200 °С) разгерметизировались в процессе выдержки и разрушились на стадии повторного залива по указанному механизму. При температуре оболочки не более 930 °С твэлы сохранили герметичность. Сделан вывод, что до температуры, по крайней мере, 930 °С (МТ-5П) с указанной выдержкой безопасность твэлов обеспечивается.

Пониженное давление теплоносителя приводило к вздутиям оболочек. Изменение диаметра согласуется с расчетным значением по эмпирической формуле ОКБ «Гидропресс».

7. В сравнительных испытаниях свежих и высоко выгоревших твэлов впервые для отечественного топлива установлено, что основное отличие проявляется только в выходе ГПД из топлива и воздействии газового давления на оболочку. Окисление, свойства оболочек свежих и выгоревших твэлов ВВЭР практически не отличаются.

8. Повторный залив – наиболее опасный режим с возможным импульсным ростом активности теплоносителя при замене дисперсного или парового режима охлаждения на жидкостный режим. Температура теплоносителя и изменения его массовой скорости влияют на «вымывание» радионуклидов из разрушенных твэлов, если уровень температуры теплоносителя при испытаниях выше температуры плавления и кипения изотопов йода. У высоко выгоревшего топлива имеет место выход из топлива цезия и его миграция в теплоносителе. В целом выход в контур радионуклидов не велик.

9. Несмотря на охрупчивание оболочек твэлов и их локальное разрушение (испытания МТ-2 и МТ-5) удалось выполнить все транспортные операции с ТВС как с изделием. Положительное качество обеспечивают дистанционирующие решетки из нержавеющей стали (МТ-2) или сплава циркония (МТ-5 и МТ-5П), а также эффект пучка твэлов. В дисперсном режиме течения теплоносителя подтверждена интенсифицирующая роль решетки в локальном охлаждении твэлов, что положительно влияет на состояние ТВС изделия.

10. Безопасность твэлов подтверждена при условиях, подобных или более жестких, чем режимы проектных аварий на ВВЭР с потерей теплоносителя. Положительные результаты испытаний получены при температуре оболочки 350...950 °С для времени выдержки, характерном для проектных аварий. Разрушение твэлов возможно на стадии повторного залива после выдержки при температуре оболочки около верхней границы (1200 °С). Конструкторскими решениями и консервативностью кодов обеспечивается запас по температуре до предельного значения.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. Махин В.М., Мельдер Р.Р. Устройство для облучения материалов в ядерном реакторе. А.с.№ 611510. 1978. БИ. №29. 1981. С.286.
2. Махин В.М., Самигуллин Б.А., Третьяков К.А. Нагревательное устройство. А.с. №784720, 1980. БИ. №19. 1981. С.292.
3. Рогозянов А.Я., Махин В.М., Исаев Ю.Н., Самигуллин Б.А., Салимов З.Б. Устройство для измерения поперечной деформации образца. А.с. №832313. БИ. №19. 1981.
4. Головченко Ю.М., Махин В.М., Неверов В.А., Самсонов Б.В. и др. О длине аккомодации гелия в зазоре между топливом и оболочкой. Ат. энергия. Т.53. Вып.5. 1982. С.330-331.
5. Грачев А.Ф., Махин В.М., Самигуллин Б.А., Фрей А.К. Устройство для испытания твэлов в канале ядерного реактора. А.с.№1012713. 1982. БИПМ. № 24. 2002. С.415.
6. Горбатов В.К., Махин В.М., Самигуллин Б.А., Рогозянов А.Я., Самсонов Б.В. Образец для испытаний на растяжение. А.с. №1065725. 1983. БИ. №1. 1984.
7. Куприенко В.А., Маркина Н.В., Махин В.М., Цыканов В.А. Методическое и метрологическое обеспечение внутриреакторных теплофизических исследований // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). -Сер. Атомное материаловедение-1984.- Вып.2(20). С.36-41.
8. Голушко В.В., Кусиков В.Г., Махин В.М. и др. Автоматизированная система сбора и обработки данных внутриреакторного теплофизического эксперимента // ВАНТ .Сер. Атомное материаловедение-1984.- Вып.2(20). С.54-56.
9. Махин В.М., Сарксян В.В., Топоров Ю.Г., Адаев В.А. Методика и результаты внутриреакторных исследований теплофизических параметров мишеней для накопления трансплутониевых элементов в канале №1 реактора СМ // ВАНТ .Сер. Атомное материаловедение. Вып.3(23). 1986. С.42-45.
10. Махин В.М., Сарксян В.В., Гнеушева В.И. Установка для изучения теплопроводности порошковых материалов методом монотонного нагрева // ВАНТ .Сер. Атомное материаловедение. 1988.- Вып.5(30). С.46-49.
11. Джусов Ю.П., Махин В.М., Шулимов В.Н. Использование метода электророндирования в реакторных экспериментах с осушением активной зоны ВВЭР в режиме "Малая течь" // Тр. междунар. конф. "Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР", Теплофизика-95, т.1, ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск. 1995. С. 127-132 .
12. Алексеев А.В., Махин В.М. Аварии с тяжелым повреждением активной зоны водоохлаждаемых реакторов. Методы и результаты исследований. Часть 1. Исследования

тяжелых аварий на энергетических реакторах: Обзор.- Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, ISBN 5-85165-309-4. 1996.-38с.

13. Бендерская О.С., Махин В.М., Абанькин А.К., Зотов Э.А. Газо-химический мониторинг в петлевых экспериментах по обоснованию безопасности реакторов типа ВВЭР//Сб. докл. Четвертой межотр. конф. по реакторному материаловедению. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996. С.210-220.

14. Кобылянский Г.П., Махин В.М., Шулимов В.Н. и др. Состояние экспериментальных ТВС типа ВВЭР после реакторных испытаний в режимах, моделирующих аварии с потерей теплоносителя // Там же. С.148-164.

15. Смирнов В.П., Дворецкий В.Г., Цыканов В.А., Махин В.М. и др. Эксперименты по изучению поведения топлива ВВЭР в аварийных условиях// Там же. С.5-40.

16. Алексеев А.В., Махин В.М. Аварии с тяжелым повреждением активной зоны водоохлаждаемых реакторов. Методы и результаты исследований Часть 2. Методики и результаты экспериментальных исследований: Обзор.- Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР. ISBN 5-85165-315-9, 1997.-108с.

17. Goryachev A., Makhin V., Smirnov V. et al. Study of VVER-440 Fuel Rod Behavior Under SBLOCA Conditions. Report on Third International Quench Workshop, Forschungszentrum Karlsruhe, December 2-4, 1997.

18. Махин В.М. Специализированная петлевая установка ПВП-3 реактора МИР: цели и задачи создания, основные технические требования и предложения по конструкции. Сб. тр. НИИАР. Вып. 4. Димитровград., 1997. С.74-85.

19. Смирнов В.П., Смирнов А.В., Цыканов В.А., Махин В.М. и др. Экспериментальные исследования поведения топлива ВВЭР в условиях проектных аварий// Сб. докл. пятой межотр.конф. по реакторному материаловедению. Т.1. Ч. 1. Димитровград.1998.С.204-236.

20. Горячев А.В., Махин В.М., Смирнов В.П., Шулимов В.Н. и др. Результаты исследования поведения высоко выгоревших и "свежих" твэлов ВВЭР-440 в условиях аварии с осушением активной зоны//Там же.С. 247-269.

21. Махин В.М., Смирнов А.В., Смирнов В.П., Алексеев А.В. Теплофизические характеристики твэлов ВВЭР// Там же. С. 104-111.

22. Махин В.М., Шулимов В.Н. Опыт проведения реакторных испытаний твэлов ВВЭР в режиме аварии с потерей теплоносителя (эксперименты "малая течь" на реакторе МИР)//Там же. С. 237-246.

23. Smirnov V., Smirnov A., Tzikanov V., Ovchinnikov V., Makhin V., et al " Zr-1%Nb (VVER) high burnup fuel tests under transient and accident conditions", NUREG/CP-0165, October, 26-28, 1998, Maryland, p.113.
24. Горячев А.В., Киселева И.В., Махин В.М., Смирнов В.П., Шулимов В.Н. (НИИАР), Аксенов П.М., Бек Е.Г., Цибуля В.А. (ОАО МСЗ), Терасвирта Р. (IVO) Результаты исследования поведения высоко выгоревших и "свежих" твэлов ВВЭР-440 в условиях аварии с осушением активной зоны// Тр. междунар. конфер. "Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР". Теплофизика-98.Т.1. ГНЦ РФ ФЭИ. Обнинск. 1998. С.338-345.
25. Махин В.М., Шулимов В.Н. Экспериментальное изучение поведения многоэлементных ТВС и твэлов ВВЭР в аварийных режимах эксплуатации с потерей теплоносителя. // Тр. междунар. конф. "Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР". Теплофизика-98. Т.2. ГНЦ РФ ФЭИ. Обнинск. 1998. С. 27-36.
26. Спассков В.П., Шумский А.М., Махин В.М. и др. Реакторные исследования аварийного поведения активной зоны ВВЭР на петлевой установке ПВП-2 реактора МИР// Там же. С.42-51.
27. Алексеев А.В., Махин В.М. Применение кода MELCOR для расчетного анализа параметров испытаний 19-элементного фрагмента ТВС ВВЭР в канале исследовательского реактора МИР (эксперимент МАЛАЯ ТЕЧЬ-2) // Там же. С. 199-207.
28. Семидоцкий И.И., Махин В.М. Применение теплогидравлического кода RELAP5.MOD3 для анализа режима петлевых испытаний в исследовательском реакторе МИР твэлов ВВЭР при параметрах аварии "Малая течь" // Там же. С. 208-217.
29. Куприенко В.А., Махин В.М., Шулимов В.Н. (НИИАР), Самойлов О.Б., Кууль В.С., Фальков А.А., Лепехин А.Н. (ОКБМ), Морозов А.В. (ВНИИНМ) Реакторные испытания сборки твэлов с интерметаллидным топливом в режиме "Малая течь" на петле ПВП-2 реактора МИР. // Тр. междунар. конф. "Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР". Теплофизика -98.Т.1. ГНЦ РФ ФЭИ. Обнинск. 1998. С.7-13.
30. Алексеев И.Н., Василевич Т.И., Малышев А.М., Махин В.М. и др. Высокотемпературный теплогидравлический стенд для исследований и испытания элементов реакторных установок// Сб. тр. НИИАР. Вып. 2. Дмитровград. 1999. С.111-122.
31. Алексеев А.В., Махин В.М., Шулимов В.Н. Применение кода MELCOR для расчетного анализа параметров испытаний 19-элементного фрагмента ТВС ВВЭР в канале исследовательского реактора МИР (эксперимент « Малая течь-2»)// Сб. тр. ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». Вып. 4. Дмитровград. 2000. с.49-60.

32. Горячев А.В., Махин В.М., Шулимов В.Н. и др. Основные результаты испытаний на реакторе МИР-М1 фрагментов ТВС ВВЭР в режиме аварий с потерей теплоносителя// Сб. докл. шестой российской конфер. по реакторному материаловедению. Т.2. Ч.1. Димитровград. 2001.С.251-264.
33. Алексеев А.В., Горячев А.В., Киселева И.В., Махин В.М. , Шулимов В.Н. Основные результаты испытаний в канале реактора МИР.М1 фрагментов ТВС ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 в режиме LOCA. Тез. доклада на 2-ю Всеросс. научно-техническую конференцию. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Подольск. 2001.С.31.
34. Кузнецов Ю.Н., Смирнов В.П., Третьяков И.Т., Махин В.М. и др. Экспериментальная установка для внутриреакторных исследований проектных, запроектных и тяжелых аварий на энергетических установках с водоохлаждаемыми реакторами// Сб.тр. междунар. научно-техн. конфер. Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии, Димитровград, 2002, т.2, ч.2, с. 104-123.
35. Махин В.М., Семидоцкий И.И. Применение кодов «КОРСАР» и «RELAP» для расчетного анализа реакторных экспериментов «Малая течь». Тез. доклада на международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование».РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 5-8 октября,2004, стр. 61-62. Доклад опубликован в ВАНТ , серия: Математическое моделирование физических процессов, №4, 2004.
36. Горячев А.В., Киселева И.В., Махин В.М. и Шулимов В.Н. Интегральные реакторные эксперименты по испытанию многоэлементных фрагментов ТВС ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 при параметрах аварии с потерей теплоносителя. // «Изв. вузов. Яд. энергетика», №3, 2004.С.50-58.
37. Алексеев А.В., Махин В.М., Шулимов В.Н. Применение кода MELCOR для расчетного анализа параметров испытаний 19-элементного фрагмента ТВС ВВЭР в канале исследовательского реактора МИР (эксперимент « Малая течь-2»)// ВАНТ, сер. Физика яд. реакторов, Динамика и безопасность ЯЭУ, вып. 2, 2004. С. 38-47.
38. Горячев А.В., Киселева И.В., Махин В.М. и Шулимов В.Н. Интегральные реакторные эксперименты по испытанию многоэлементных фрагментов ТВС ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 при параметрах аварии с потерей теплоносителя. Обобщение результатов по циклу экспериментов «Малая течь»// ВАНТ, сер. Физика яд. реакторов, Динамика и безопасность ЯЭУ, вып. 2, 2004. С. 29-37.

Подписано в печать 29.12.04. Формат 60 x 84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 866.

Нижегородский государственный технический университет.
Типография НГТУ. 603600, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

