

БАЗЮК СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА МОДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ
СБОРОК ВВЭР ПРИ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОЕКТНОЙ И
ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИЯХ**

Специальность: 01.04.14 – "Теплофизика и теоретическая теплотехника"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии “Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение “ЛУЧ” и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Национальный исследовательский университет МЭИ” на кафедре Инженерной теплофизики.

Научный руководитель: доктор технических наук, проф.
Кузма-Кичта Юрий Альфредович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Сергеев Виктор Васильевич
кандидат физико-математических наук
Волчек Александр Михайлович

Ведущая организация:

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН)

Защита состоится **11 ноября 2011** года в **10:00** на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при Московском энергетическом институте по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.17, корп. Т, кафедра Инженерной теплофизики, комн. Т-206.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского энергетического института.

Автореферат разослан **10 октября** 2011 года

Отзывы на автореферат с подписями, заверенными печатью учреждения, просим посылать на адрес: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.14, Ученый Совет МЭИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.04

к.т.н., доцент

_____ Ястребов А.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. За время существования атомной энергетики произошли аварии на различных АЭС и среди них - три наиболее крупные: Три Майл Айленд (28.03.1979), Чернобыльская (26.05.1986), Фукусима Даи-ичи (11.03.2011). Произошедшие катастрофы убеждают в необходимости проведения исследований максимальных проектных (МПА), запроектных (ЗПА) и тяжелых аварий на АЭС. Поэтому в настоящее время во всем мире, в том числе и в России, проводится более детальный анализ безопасности атомных станций на всех стадиях эксплуатации и, прежде всего, в условиях аварии ЯЭУ.

Знания о механизме каждой из стадий необходимы для анализа безопасности реакторов и поиска средств управления аварией. Исследование первой и второй стадий является наиболее целесообразным, так как принимаемые меры для предотвращения дальнейшего развития аварии в этих условиях наиболее эффективны. Однако если авария перешла в запроектную стадию, необходимо, чтобы и в этих условиях методы и средства управления аварией оставались эффективными для недопущения ее перехода в тяжелую стадию. Для разработки рекомендаций по управлению аварией на всех стадиях для проектируемых и эксплуатирующихся АЭС необходимо исследовать повторный залив тепловыделяющих сборок (ТВС) в условиях, близких к реальным.

В настоящее время исследуется повторный залив с образованием водорода при моделировании МПА и ЗПА на модельных ТВС ВВЭР и PWR на стендах ПАРАМЕТР (подача охлаждающей воды снизу, сверху или комбинированным способом, ФГУП “НИИ НПО “ЛУЧ”, Подольск, Россия) и Quench (подача охлаждающей воды снизу, Исследовательский центр, Карлсруэ, Германия).

Однако сложная геометрия каналов и структуры нестационарного многофазного потока, высокие параметры среды обуславливают трудности моделирования и недостаточную изученность процессов теплообмена, возникающих при аварийном охлаждении. Имеющиеся данные по повторному заливу модельных сборок ВВЭР крайне ограничены. Отсутствуют массивы данных и обобщающие соотношения по скорости фронта смачивания (u_{fp}) одиночных имитаторов ТВЭЛ и модельных ТВС ВВЭР из штатных конструктивных элементов при заливе сверху и снизу в условиях разгерметизации и раздутия окисленных оболочек. Необходимо проводить верификацию существующих расчетных кодов для анализа процессов разогрева и охлаждения ТВЭЛ ВВЭР в условиях аварии с потерей теплоносителя при изменении площади проходного сечения. Необходимо разрабатывать методику оценки основных характеристик расхолаживания при повторном заливе снизу и сверху

одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС ВВЭР в условиях МПА и ЗПА. На решение вышеприведенных задач направлена настоящая работа, что обуславливает ее актуальность.

Целью работы является расчетно-экспериментальное исследование повторного залива одиночных имитаторов твэлов и модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР из штатных конструкционных элементов при максимальной проектной и запроектной авариях.

Научная новизна:

- получены данные по температурным режимам одиночных имитаторов твэлов при заливе снизу и 19-ти и 37-ми стержневых ТВС ВВЭР при заливе снизу и сверху из штатных конструкционных элементов на стенде ПАРАМЕТР в диапазонах изменения режимных параметров в опытах: с одиночными имитаторами – максимальная температура оболочки до залива $T_{ст0} = 760 \div 1190$ °С, расход подачи воды залива $\rho w = 12 \div 78$ кг/(м²·с), мощность, имитирующая остаточное тепловыделение, $q_l = 0 \div 4,5$ кВт/м, температура воды на входе в РУ $T_{вх} = 20$ °С; модельными ТВС ВВЭР – $T_{ст0} = 500 \div 1160$ °С (НЗ), $T_{ст0} = 460 \div 1490$ °С (ВЗ), $\rho w = 13 \div 19,5$ кг/(м²·с) (ВЗ), $\rho w = 49 \div 81$ кг/(м²·с) (НЗ), $\Delta T_{нед} = 80 \div 120$ °С. Во всех экспериментах оболочки окисленные, а в ряде - раздутые и разгерметизированные;

- впервые получены массив данных и обобщающее соотношение для скорости фронта смачивания одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС ВВЭР при **заливе снизу (НЗ)** в условиях разгерметизации и раздутия окисленных оболочек. Установлена зависимость $u_{фр}$ от температуры оболочки, массового расхода охлаждающей воды и подведенного тепла. Показано, что на скорость фронта смачивания влияют также раздутие и разгерметизация оболочки, окисление поверхности и возможно изменение $u_{фр}$ до 3 раз по длине и сечению модельной ТВС. Обнаружено, что известные соотношения в исследованных условиях предсказывают скорость фронта смачивания до 2÷3 раз больше, чем в эксперименте;

- впервые получены массив данных и обобщающее соотношение для скорости фронта смачивания модельных ТВС ВВЭР из штатных конструкционных элементов с окисленными оболочками при **заливе сверху (ВЗ)**. Установлена зависимость $u_{фр}$ от температуры оболочки, массового расхода охлаждающей воды. Обнаружено, что влияние температуры оболочки на скорость фронта смачивания более существенное, чем при заливе снизу;

- совместно с ОКБ “Гидропресс” подтверждена применимость расчетных моделей, реализованных в кодах КАНАЛ-97, КОРСАР/ГП, для анализа процессов разогрева и охлаждения твэлов ВВЭР при аварии с потерей теплоносителя в ус-

ловиях изменения площади проходного сечения для теплоносителя до 5% вследствие раздутия их оболочек;

- усовершенствована балансовая методика оценки основных характеристик расхолаживания при повторном заливе снизу или сверху одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС ВВЭР в условиях МПА и ЗПА, удовлетворительно описывающая опытные данные в диапазоне температур до 1200 °С.

Достоверность представленных в диссертации результатов обосновывается использованием на стенде ПАРАМЕТР современных приборов высокого класса точности, воспроизводимостью опытных данных при различной скорости опроса датчиков, проведением необходимых тарировок измерительных средств и выполнением баланса подведенного и отведенного от ТВС тепла.

Полученные массивы данных по скорости фронта смачивания одиночных имитаторов твэлов и модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР согласуются с имеющимися представлениями об исследованных процессах.

Надежность предложенной методики оценки основных характеристик расхолаживания одиночного имитатора твэла и модельной ТВС при повторном заливе подтверждается тем, что она основана на балансе подведенного и отведенного тепла и согласуется с результатами расчета и опытными данными, полученными для штатных конструктивных элементов активной зоны реактора ВВЭР в диапазоне температур до 1200 °С.

Расчитанная максимальная температура оболочки одиночного имитатора твэла ВВЭР, время ее достижения и основные характеристики повторного смачивания в условиях МПА по двум лицензионным (КАНАЛ-97 и КОРСАР/ГП) и специально разработанному для проведения испытаний на стенде ПАРАМЕТР (PARAM-TG) кодам согласуются с экспериментальными данными.

Практическая ценность работы. Данные по температурным режимам твэлов, изготовленных из штатных конструктивных элементов, в условиях МПА и ЗПА использованы для верификации кодов КОРСАР/ГП, КАНАЛ-97, предназначенных для анализа безопасности АЭС с ВВЭР, и кода PARAM-TG, разработанного для расчетного сопровождения экспериментов на стенде ПАРАМЕТР.

Полученные температурные режимы, созданные массивы данных и обобщающие соотношения по скорости фронта смачивания одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС ВВЭР с окисленными, раздутыми и разгерметизированными оболочками могут быть применены при разработке и верификации моделей повторного залива при МПА и ЗПА как существующих, так и усовершенствованных теплогидравлических кодов улучшенной оценки.

Усовершенствованная балансовая методика позволила оценить основные характеристики расхолаживания одиночного имитатора твэла и модельной

тепловыделяющей сборки ВВЭР и может быть использована при подготовке сценариев экспериментов по повторному заливу снизу или сверху как на стенде ПАРАМЕТР, так и на других установках.

Личный вклад автора состоит в:

- обработке температурных режимов 20 экспериментов по повторному заливу одиночных имитаторов твэлов (НЗ) и 23 – модельных 19-ти и 37-ми стержневых ТВС ВВЭР (НЗ и ВЗ) из штатных конструкционных элементов на стенде ПАРАМЕТР. Во всех экспериментах на одиночных имитаторах твэлов, а также в 9 – на модельных ТВС автор принимал непосредственное участие и выполнял пре- и посттестовые расчеты с помощью кода PARAM-TG;
- создании массивов данных и получении обобщающих соотношений по скорости фронта смачивания одиночных имитаторов твэлов и модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР с окисленными при заливе сверху и раздутыми, разгерметизированными и окисленными оболочками – при заливе снизу;
- сопоставлении экспериментальных данных по максимальной температуре оболочки одиночного имитатора твэла ВВЭР, времени ее достижения и характеристик повторного смачивания в условиях МПА на стенде ПАРАМЕТР с результатами расчетов с помощью лицензионных кодов КОРСАР/ГП, КАНАЛ-97, выполненных совместно с ОКБ “Гидропресс”;
- усовершенствовании балансовой методики оценки основных характеристик расхолаживания одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС ВВЭР и проведении сопоставления с опытными данными, полученными для штатных конструкционных элементов в диапазоне температур до 1200 °С.

Основные положения работы, выносимые на защиту:

1. Результаты расчетно-экспериментального исследования температурных режимов при повторном заливе снизу и сверху одиночных имитаторов твэлов и модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР из штатных конструкционных элементов при максимальной проектной и запроектной авариях.

2. Массивы данных и обобщающие соотношения по $u_{фр}$ окисленных, раздутых и разгерметизированных одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС ВВЭР при заливе снизу и сверху в условиях МПА и ЗПА.

3. Данные по температурным режимам одиночных имитаторов твэлов ВВЭР в условиях МПА, полученные в экспериментах на стенде ПАРАМЕТР, и результаты расчетов по коду PARAM-TG на стадии нагрева и по кодам КАНАЛ-97, КОРСАР/ГП совместно с ОКБ “Гидропресс” - на всех стадиях аварии, включая повторный залив, а также их сопоставление.

4. Балансовая методика оценки основных характеристик расхолаживания

одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС ВВЭР при заливе снизу и сверху в условиях максимальной проектной аварии, применяемая для штатных конструкционных элементов в диапазоне температур до 1200 °С.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены на: XVII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, ЦАГИ, г. Жуковский, 2009 г.; Шестнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика”, МЭИ, г. Москва, 2010 г.; семинаре ИБРАЭ РАН, г. Москва, 22 сентября 2010 г.; Пятой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5), МЭИ, г. Москва, октябрь 2010 г.; Семнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика”, МЭИ, г. Москва, 2011 г.; заседании кафедры ИТФ МЭИ 6 апреля 2011 г.; 7ой МНТК “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, ОКБ “Гидропресс”, г. Подольск, 2011 г.; XVIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, Звенигород, 2011 г.

Основное содержание диссертации отражено в 7 печатных работах, в том числе в одной статье в журнале, рекомендованном ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Текст иллюстрируют 64 рисунка и 6 таблиц, список использованной библиографии составляет 53 пункта. Общий объём диссертации составляет 130 машинописных страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы.

В первой главе анализируются имеющиеся исследования повторного залива одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС, даны описания кодов КАНАЛ-97, КОРСАР/ГП и PARAM-TG, используемых для расчета основных характеристик МПА и ЗПА. Сформулированы задачи исследования.

Во второй главе приводятся описания экспериментального стенда ПАРАМЕТР, рабочих участков и методики исследования скорости фронта смачивания одиночных имитаторов твэлов и модельных тепловыделяющих сборок в условиях максимальной проектной и запроектной аварий ВВЭР.

Основными элементами и устройствами стенда являются: рабочий участок с модельной ТВС; системы: электронагрева модельной ТВС и питания стенда, генерации и конденсации пара, аварийного залива модельной тепловыделяющей сборки снизу и сверху, обеспечения аргоном и гелием, контроля и анализа водорода, а также информационно-измерительная.

Рабочие участки. На стенде ПАРАМЕТР исследованы рабочие участки (РУ) с одиночными имитаторами твэлов и модельными ТВС. Одиночный имитатор твэла устанавливался в корпус $\text{Ø}32 \times 2 \times 1490$ мм, выполненный из стали 12Х18Н10Т. На боковой поверхности корпуса расположены штуцеры входа и выхода аргона, пара и охлаждающей воды для осуществления залива твэла снизу. Снаружи корпуса рабочего участка установлен слой теплоизоляции толщиной 34 мм из двуокиси циркония ZYFB-3 или шамотного кирпича ШВП-350. Электроизоляция нагревателя твэла обеспечивается верхним и нижним металлокерамическими узлами (МКУ). В верхнем фланце установлены МКУ для ввода и герметизации датчиков температуры и давления. Конструкция рабочего участка обеспечивает проведение испытаний имитаторов твэлов при температуре оболочки до 1200°C и давлении до 6,0 МПа.

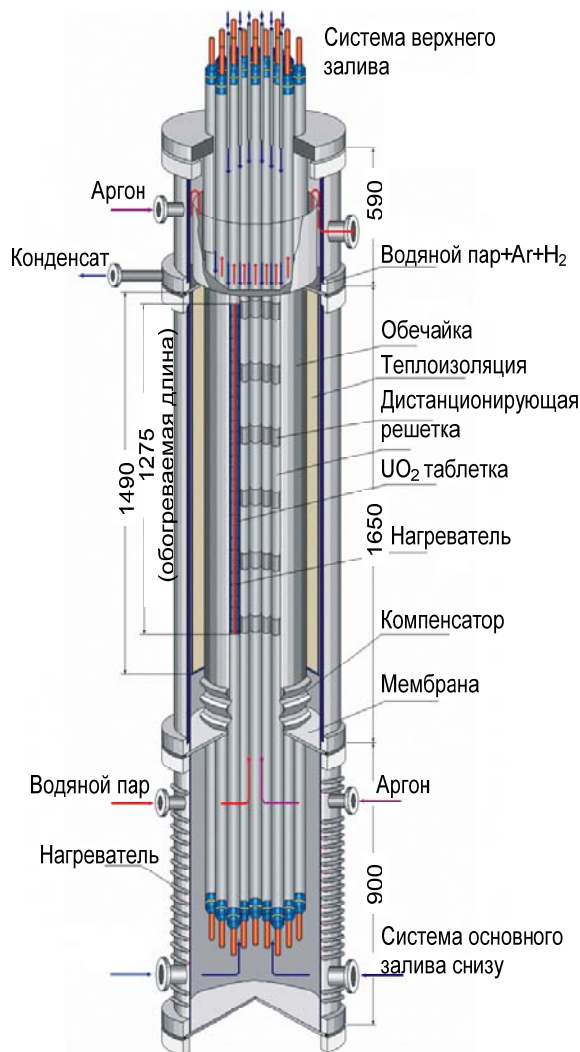


Рис. 1. Рабочий участок стенда ПАРАМЕТР для испытаний модельных ТВС в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA)

Корпус РУ для испытаний модельных ТВС (рис. 1) состоит из трех секций, соединенных фланцами. Верхняя секция предназначена для ввода в рабочий объем и герметизации имитаторов твэлов, термопар и трубок системы верхнего залива, подачи аргона при нижнем заливе, вывода парогазовой смеси из рабочего участка в теплообменник - конденсатор, отвода и контроля объема воды, поступившей из модельной сборки при заливе сверху. Верхняя секция РУ состоит из корпуса, изготовленного из трубы $\text{Ø}133 \times 6$ мм из нержавеющей стали и оснащенного кожухом водяного охлаждения, двух водоохлаждаемых фланцев, направляющего канала, экрана. В корпусе установлены штуцеры вывода парогазовой смеси, подачи аргона при нижнем заливе, отвода воды из модельной сборки при верхнем заливе.

Средняя секция предназначена для размещения модельной ТВС, теплоизоляции, системы регистрации и контроля параметров испытаний, а также компенсации температурных расширений обе-

чайки. Корпус средней секции выполнен из стальной трубы $\varnothing 133 \times 6$ мм и оборудован кожухом водяного охлаждения. В корпусе соосно располагаются модельная тепловыделяющая сборка, цилиндрическая циркониевая обечайка $\varnothing 69,7 \times 1,2$ мм, слой теплоизоляции. Верхняя и нижняя разделительные мембраны вместе с компенсирующим сильфоном служат для герметизации исследуемой ТВС.

Нижняя секция рабочего участка служит для отдельной подачи пара, аргона и охлаждающей воды снизу в рабочий объем модельной сборки. Корпус нижней секции изготовлен из двух труб $\varnothing 156 \times 6 \times 690$ мм, $\varnothing 203 \times 3 \times 210$ мм из нержавеющей стали и снабжен нагревателем В корпусе установлены штуцеры подвода пара, аргона, охлаждающей воды при нижнем и аварийном заливах. Верхний и нижний водоохлаждаемые фланцы используются для ввода токоподводов, термопар и слива воды.

Методика исследования. Согласно сценарию эксперимента происходят разогрев ТВС в потоке пара до максимальной температуры, предокисление оболочек при этой температуре и залив ТВС водой снизу или сверху. Согласно методике на каждой кривой $T_c(\tau)$ (рис. 2) на стадии залива выделялись три характерные точки с резким изменением градиента температуры во времени, и скорость фронта смачивания определялась по формуле:

$$u_{\text{фр},k}^i = \left(z_{\text{фр}}^{i+1} - z_{\text{фр}}^i \right) / \left(\tau_k^{i+1} - \tau_k^i \right), \quad (1)$$

где индекс k показывает соответствующую характерную точку, для которой выполняется расчет; i – номер термопары на данном имитаторе твэла.

При анализе данных обнаружено, что в диапазоне изменения режимных параметров, имеющих место в эксперименте, различие в значениях скорости фронта смачивания, определенных по трем указанным на рисунке 2 точкам, составляет не более 23%. Однако $u_{\text{фр}}$ проще определить по моменту времени, когда температура оболочки достигает значения T_s .

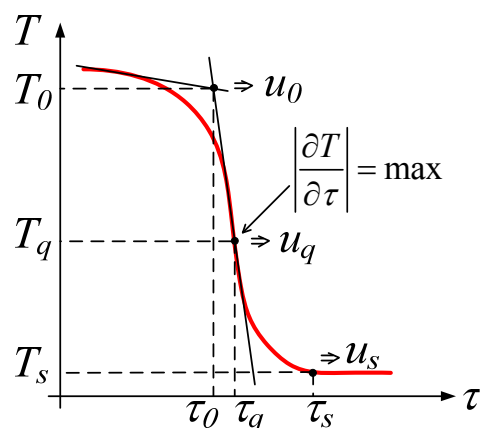


Рис. 2. Методика определения скорости фронта смачивания

В главе 3 представлены данные по температурным режимам и скоростям фронта смачивания одиночных имитаторов твэлов и модельных тепловыделяющих сборок. Всего было обработано 20 экспериментов по повторному заливу одиночных имитаторов твэлов (НЗ) и 23 – модельных 19-ти и 37-ми стержневых ТВС ВВЭР (НЗ и ВЗ) из штатных конструкционных

элементов, проведенных на стенде ПАРАМЕТР. Диапазоны изменения режимных параметров в опытах: с одиночными имитаторами – максимальная температура оболочки до залива $T_{ст0} = 760 \div 1190$ °C, массовая скорость охлаждающей воды $\rho w = 12 \div 78$ кг/(м²·с), мощность, имитирующая остаточное тепловыделение, $q_l = 0 \div 4,5$ кВт/м, температура воды на входе в РУ $T_{вх} = 20$ °C; с модельными ТВС ВВЭР – $T_{ст0} = 500 \div 1160$ °C (НЗ), $T_{ст0} = 460 \div 1490$ °C (ВЗ), $\rho w = 13 \div 19,5$ кг/(м²·с) (ВЗ), $\rho w = 49 \div 81$ кг/(м²·с) (НЗ), $\Delta T_{нед} = 80 \div 120$ °C. Во всех экспериментах оболочки окисленные, а в ряде - раздутые и разгерметизированные.

На рис. 3а,б представлены температурные режимы оболочек 19 стержневых модельных ТВС ВВЭР при заливе снизу в условиях МПА и сверху – в условиях ЗПА соответственно, полученные ранее на стенде ПАРАМЕТР и обработанные в настоящей работе.

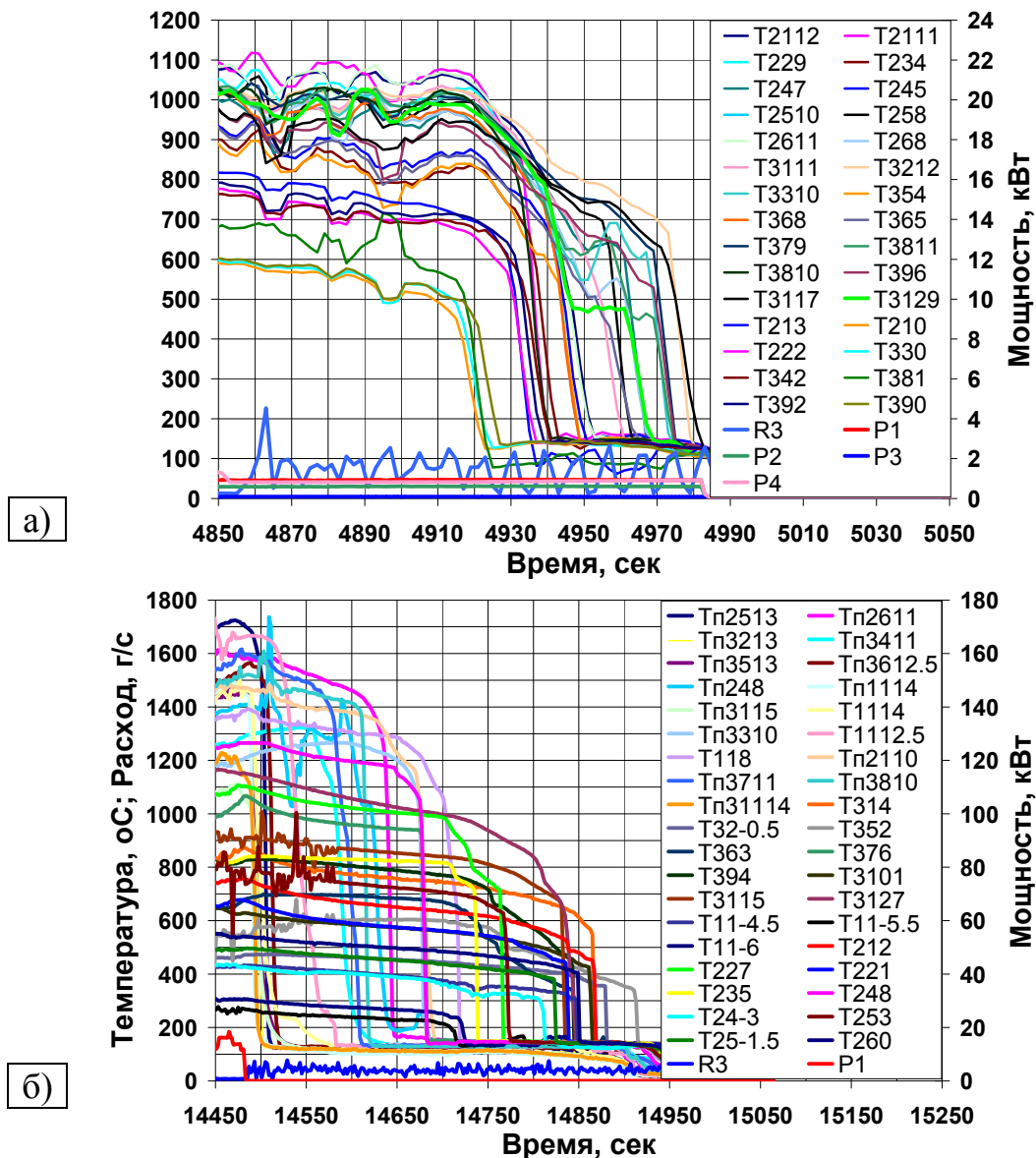


Рис. 3. Термограммы при повторном заливе 19 стержневой модельной ТВС ВВЭР: а) снизу, б) сверху

На рисунке приведены кривые расхода воды (R3), мощности нагревательных секций (P1÷ P4), термограммы для различных термопар и обозначения (например, T2112), содержащие информацию по их расположению (рис. 4): первая цифра обозначает ряд твэлов в ТВС, вторая – номер твэла в ряду, на котором установлена термопара, последующие – координату сечения по длине (x 100 мм).

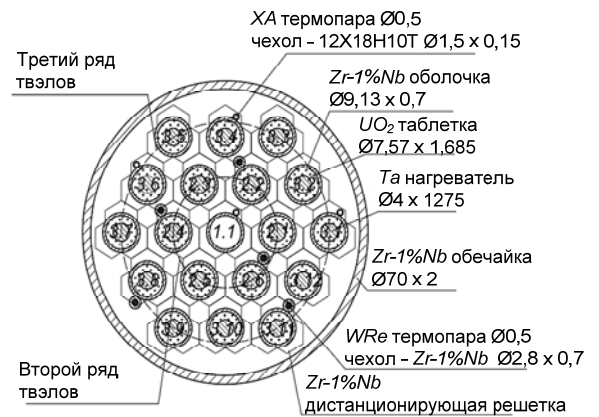


Рис. 4. Поперечное сечение 19 стержневой модельной ТВС

На каждой кривой можно выделить три характерных участка: предварительного охлаждения, резкого спада температуры и зону с примерно постоянной температурой. Резкие колебания температуры оболочки ряда термограмм вызваны наводками. Температура и время, соответствующие возникновению резкого спада $T_c(\tau)$, существенно различаются из-за неодинаковых условий в точках измерений.

При анализе полученных в работе результатов по скорости фронта смачивания использованы данные посттестовых материаловедческих исследований на стенде ПАРАМЕТР, включающие окружную деформацию оболочек по длине твэлов и состояние поверхности (рис. 5, 6).

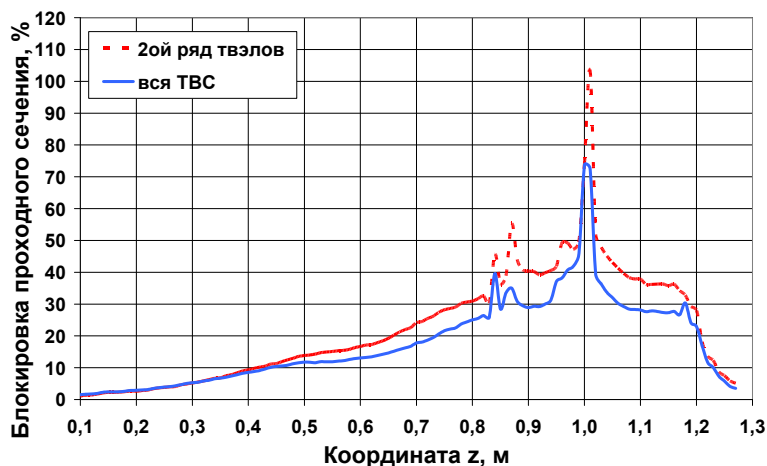


Рис. 5. Характерное распределение блокировки проходного сечения 19 стержневой модельной ТВС по длине при исследовании МПА



Рис. 6. Внешний вид раздутого и разгерметизированного твэла после проведения эксперимента

Установлено, что при нижнем заливе в условиях МПА скорость фронта смачивания в области недеформированной ТВС примерно постоянная. В зоне деформированной ТВС $u_{фр}$ изменяется до 3 раз по длине и сечению (рис. 7) и происходят перераспределение потока и изменение направления движения

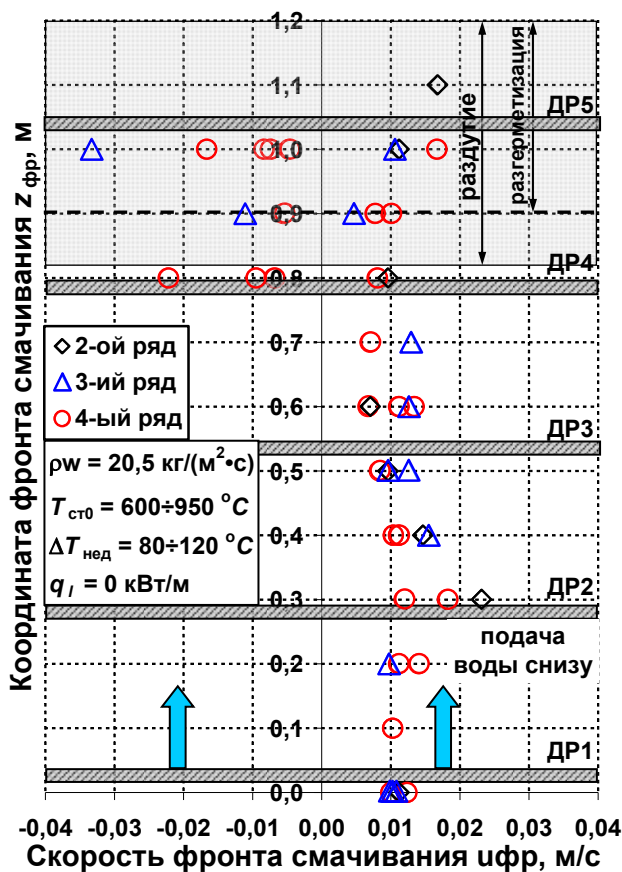


Рис. 7. Изменение скорости фронта смачивания по длине ТВС при нижнем заливе в условиях МПА

следующими уравнениями с погрешностью $\pm 20\%$:

$$u_{фр}(\rho_w, T_0, q_l) = A \cdot (\rho_w)^{k_1} \cdot T_0^{k_2} \cdot (1 + b \cdot q_l)^{k_3} \quad (2)$$

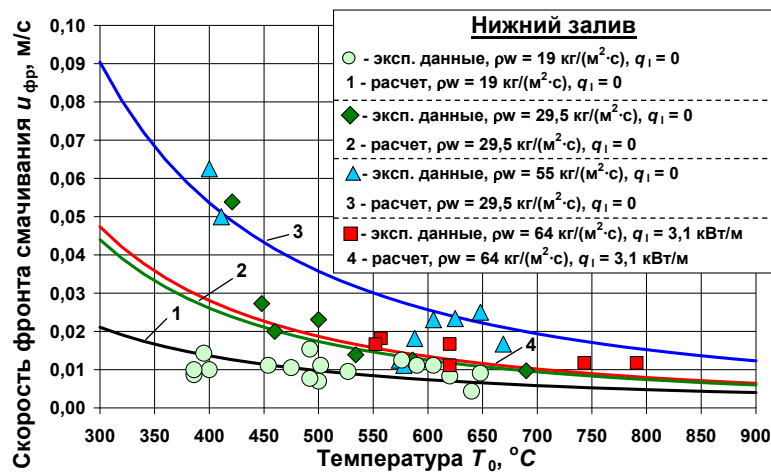
где q_l - линейная плотность электрической мощности, подводимой к ТВС, кВт/(м·ТВЭЛ); для НЗ: $A = 0,477 \cdot 10^2$, $b = 4,312$, $k_1 = 1,021$, $k_2 = -1,817$, $k_3 = -1,645$; для ВЗ: $A = 2,43 \cdot 10^2$, $b = 0$, $k_1 = 0,944$, $k_2 = -2,0$.

На рис. 8а,б показаны полученные опытные данные, а также известные и предложенные корреляции. Обнаружено, что в исследованных условиях $u_{фр}$ до 2÷3 раз меньше, чем по результатам расчета согласно известным соотношениям. Относительно малый разброс опытных данных в области высоких температур при верхнем заливе (рис. 8б) можно объяснить тем, что избыточное давление в ТВЭлах было пониженным, вследствие чего не происходили раздутие и разгерметизация оболочек исследуемых ТВС.

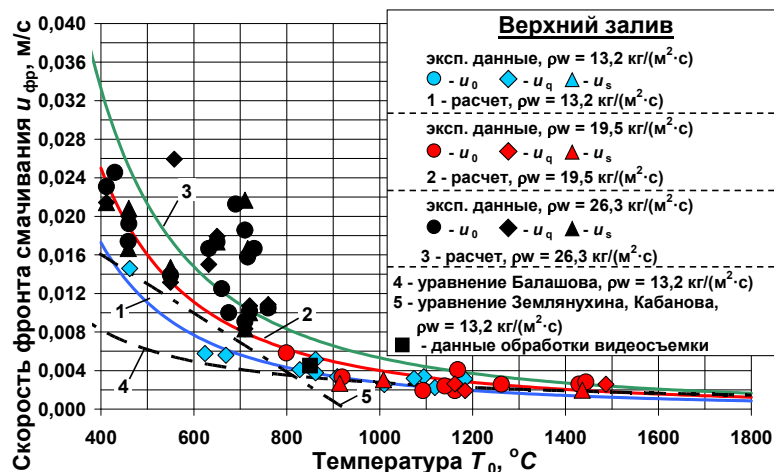
В главе 4 представлены данные по температурным режимам одиночных имитаторов ТВЭлов ВВЭР в условиях МПА, полученные в экспериментах на стенде ПАРАМЕТР, и согласно расчетам по существующим кодам. Для расчета выбраны лицензионные коды КАНАЛ-97, КОРСАР/ГП, описывающие все стадии аварий в диапазоне температур оболочки ТВЭла до $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, и код

фронта смачивания. На стенде ПАРАМЕТР исследовались охлаждающие сборки в условиях ЗПА при верхнем заливе и установлено, что оболочки ТВЭлов ТВС не разрушаются при $T_{обол} \leq 1400 \text{ }^\circ\text{C}$. Обнаружено, что на ближайшей к месту входа воды и наиболее нагретой дистанционирующей решетке происходит торможение фронта смачивания.

На основании полученных данных установлены зависимости скорости фронта смачивания от начальной температуры оболочки ТВЭла, расхода охлаждающей воды и подведенного тепла, имитирующего остаточное тепловыделение. Массивы полученных экспериментальных данных по скорости фронта смачивания модельных тепловыделяющих сборок описываются



а)



б)

Рис. 8. Зависимость скорости фронта смачивания модельных ТВС ВВЭР от начальной температуры оболочки твэла и массовой скорости при различных способах подачи воды: а) снизу в условиях МПА, б) сверху в условиях ЗПА

PARAM-TG, предназначенный для сопровождения экспериментов на стенде ПАРАМЕТР на этапе нагрева модельной ТВС. Расчеты по кодам КАНАЛ-97, КОРСАР/ГП проведены совместно с ОКБ "Гидропресс". С целью верификации кодов были отобраны и проанализированы четыре эксперимента: два – на модели твэла с стальной оболочкой без топливных таблеток, и два – на штатном имитаторе твэла ВВЭР.

На рис. 9 приведено сравнение измеренной температуры (T_6) стальной оболочки имитатора твэла с рассчитанной по кодам КАНАЛ-97, КОРСАР/ГП и PARAM-TG при моделировании остаточного тепловыделения. Все коды удовлетворительно предсказывают изменение температуры оболочки во времени на стадии нагрева имитатора до достижения T_{\max} . Максимальная температура оболочки имитатора твэла, рассчитанная по кодам КАНАЛ-97, PARAM-TG, КОРСАР/ГП, превышает измеренную на 2%, 4% и 8% соответственно. Код PARAM-TG точнее описывает температурный режим оболочки после отключения электрической мощности до подачи охлаждающей воды,

чем коды КАНАЛ-97 и КОРСАР/ГП. На стадии повторного залива снизу длительность расхолаживания оболочки до температуры насыщения согласно коду КАНАЛ-97 больше на 5%, КОРСАР/ГП – на 11%, чем в опыте.

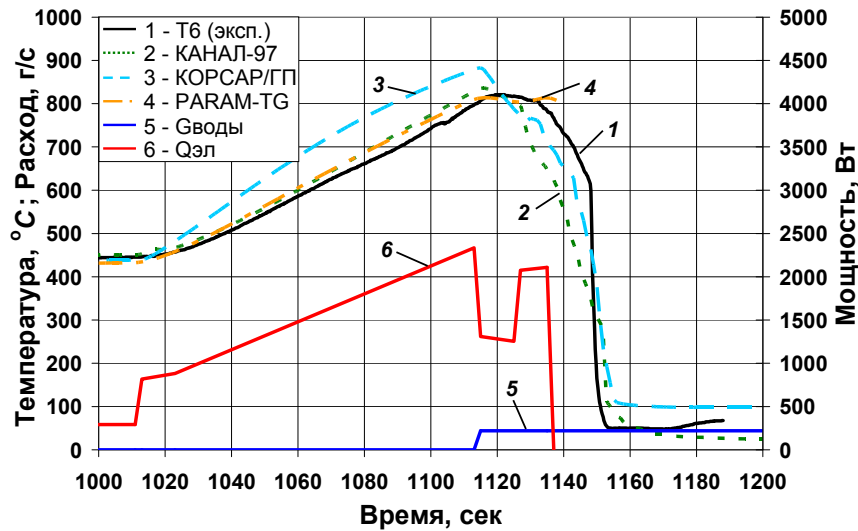


Рис. 9. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета согласно кодам КАНАЛ-97, КОРСАР, PARAM-TG при повторном заливе снизу стального имитатора твэла при моделировании остаточного тепловыделения

На рис. 10а приведено сравнение измеренной температуры оболочки (T_5) штатного имитатора твэла ВВЭР с рассчитанной по кодам КАНАЛ-97, КОРСАР/ГП и PARAM-TG. Рассмотренные коды удовлетворительно описывают стадию предварительного нагрева. Код КОРСАР/ГП предсказывает в конце этого этапа температуру оболочки имитатора 874 °C, что на 80 °C больше, чем в опыте, а результаты расчета T_{\max} с помощью кодов КАНАЛ-97 и PARAM-TG практически совпадают с измеренной величиной. На данной стадии все коды учитывают нагрев имитатора твэла за счет подвода электрической мощности и пароциркониевой реакции. Пунктирной линией на рисунке показан момент времени разгерметизации твэла, определяемый по резкому спаду кривой избыточного давления гелия. Температуры оболочки в этот момент, предсказанные кодами КАНАЛ-97 и PARAM-TG, близки и составляют 830 °C, а согласно коду КОРСАР/ГП получено на 90 °C большее значение. При этом давление гелия под оболочкой твэла составляло 3,62 МПа. Рассмотренные коды качественно описывают второй наброс подведенной мощности. Причиной расхождения являются наводки, оказавшие влияние на показания термопар. Различие температур оболочки на этапе предокисления при достижении их максимальных значений, рассчитанных с помощью трех кодов и измеренной, не превышает 100 °C. Длительность охлаждения до температуры

насыщения согласно коду КАНАЛ-97 меньше на 33%, КОРСАР/ГП – больше на 3%, чем в опыте.

На рис. 10б представлены температурные режимы оболочки штатного имитатора твэла при максимальной температуре 1200 °С. По сравнению с опытом при нагреве имитатора твэла до пиковой температуры 900 °С отмечены отличия:

- разгерметизация оболочки происходит при температуре 870 °С и давлении гелия под оболочкой 3,42 МПа, что на 40 °С больше и 0,2 МПа меньше, чем соответствующие значения в предыдущем эксперименте;
- большее тепловыделение за счет парациркониевой реакции.

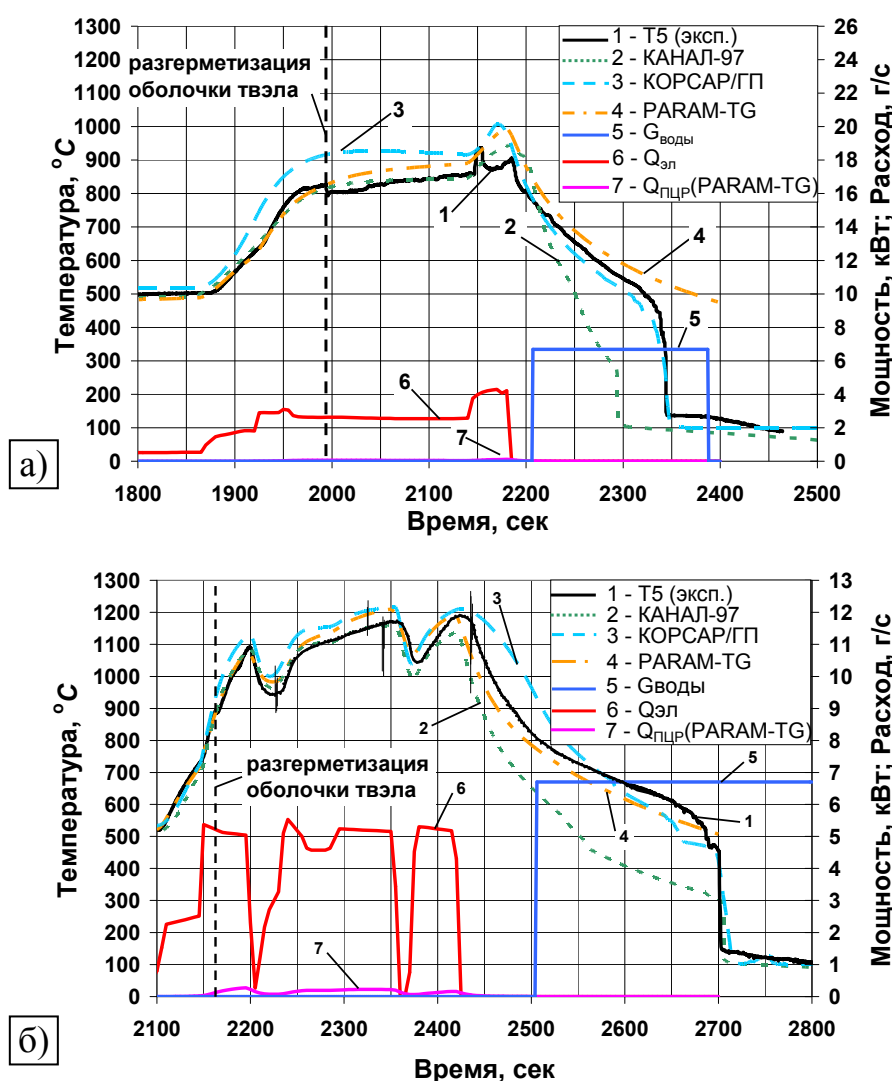


Рис. 10. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета согласно кодам КАНАЛ-97, КОРСАР/ГП, PARAM-TG при повторном заливе снизу имитатора твэла в случае различной максимальной температуры оболочки:
 а) 900 °С,
 б) 1200 °С

Таким образом, на стадии повторного залива одиночного имитатора твэла ВВЭР можно отметить удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных по температуре оболочки. Показано, что применение кодов КАНАЛ-97, КОРСАР/ГП для анализа процессов разогрева и охлаждения твэлов ВВЭР при аварии с потерей теплоносителя обоснованно при малых раздутиях оболочек, приводящих к изменению площади проходного сечения до 5%.

В главе 5 дано описание балансовой методики оценки основных характе-

ристик расхолаживания одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС.

В общем случае согласно предлагаемой методике уравнение баланса тепла имеет вид:

$$\left(Q_{зап}^{твэл} + Q_{зап}^{ДР} + Q_{зап}^{обеч} + Q_{зап}^{ТЭП}\right) + Q_{эл}^{внеш} + Q_{хим}^{ПЦР} = Q_{нагр}^{воды} + Q_{фаз} + Q_{нагр}^{нар}, \quad (3)$$

где $Q_{зап}^{твэл}$, $Q_{зап}^{ДР}$, $Q_{зап}^{обеч}$, $Q_{зап}^{ТЭП}$ - запасенное тепло в одиночном имитаторе твэла или модельной ТВС, дистанционирующих решетках, обечайке и термопарах соответственно; $Q_{эл}^{внеш}$ - подведенное джоулево тепло, выделяющееся в нагревателе каждого имитатора твэла; $Q_{хим}^{ПЦР}$ - тепло пароциркониевой реакции; $Q_{нагр}^{воды}$, $Q_{фаз}$, $Q_{нагр}^{нар}$ - отведенное тепло за счет подогрева охлаждающей воды, фазового перехода и нагрева образовавшегося пара.

Преобразованием уравнения (3) получены соотношения, описывающие время расхолаживания $\tau_{фр}$ (4) при заданном начале отсчета времени τ_0 одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС при повторном заливе в условиях МПА и ЗПА и относительный расход пара G_n/G_e (5), образующийся в этом процессе:

$$\tau_{фр} = \tau_0 + \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^5 (\rho c_p S)_{k,j,i} (T_{cm_k,j,i} - T_s) (z_{фр}^i - z_{фр}^{i-1}) + G_{e_i} \cdot r \cdot \Delta\tau_{0_i}}{G_{e_i} \cdot r - \left(\tilde{Q}_{ПЦР_i} + \sum_{j=1}^m q_{l0_i,j} (z_{фр}^i - z_{фр}^{i-1}) \right)}, \quad (4)$$

$$\left(\frac{G_n}{G_e}\right)_i = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^5 (\rho c_p S)_{k,j,i} (T_{cm_k,j,i} - T_s) (z_{фр}^i - z_{фр}^{i-1}) + \left[\tilde{Q}_{ПЦР_i} + \sum_{j=1}^m q_{l0_i,j} (z_{фр}^i - z_{фр}^{i-1}) \right] \Delta\tau_{0_i}}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^5 (\rho c_p S)_{k,j,i} (T_{cm_k,j,i} - T_s) (z_{фр}^i - z_{фр}^{i-1}) + G_{e_i} \cdot r \cdot \Delta\tau_{0_i}}, \quad (5)$$

где m , n - число твэлов и участков по длине ТВС, ρ , c_p , S - плотность, изобарная теплоемкость и площадь поперечного сечения элемента соответственно, T_{cm_k} - температура k -го элемента тепловыделяющей сборки, q_{l0_i} - линейная плотность теплового потока, подводимая за счет пропускания электрического тока по нагревателям, $z_{фр}^i$ - координата фронта смачивания в момент времени $\tau_{фр_i}$, $\Delta\tau_{0_i} = (\tau_{0_{i+1}} - \tau_{0_i})$ - время движения охлаждающей воды в адиабатных условиях, рассчитанное по ее расходу G_{e_i} , r - теплота парообразования, T_s - температура насыщения воды, $\tilde{Q}_{ПЦР_i}$ - тепловая мощность пароциркониевой реакции.

На рис. 11 представлены данные по безразмерной координате фронта смачивания в зависимости от времени для максимальной температуры оболочки имитатора твэла 900 °С согласно измерениям на стенде ПАРАМЕТР и расчетам по балансовой методике, уравнению (2) и в предположении движения охлаж-

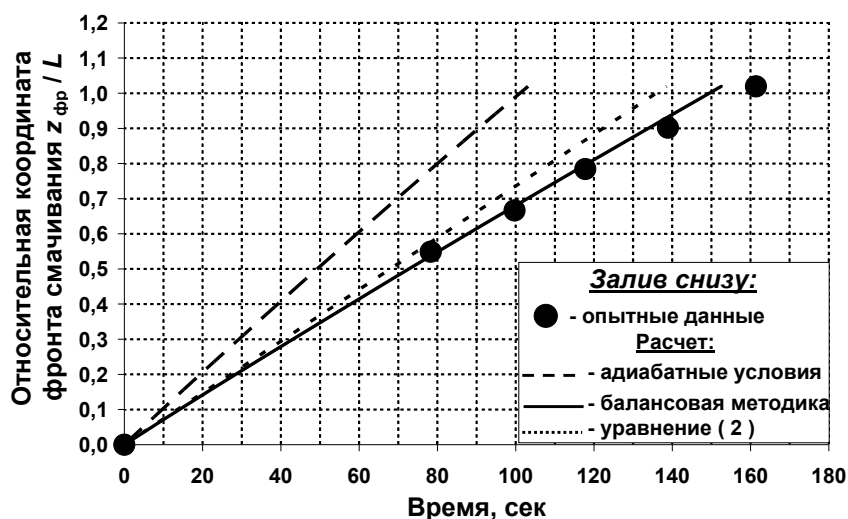


Рис. 11. Положение фронта смачивания при заливе снизу одиночного имитатора твэла ВВЭР

$$T_{обол}^{max} = 900 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\rho w = 12,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

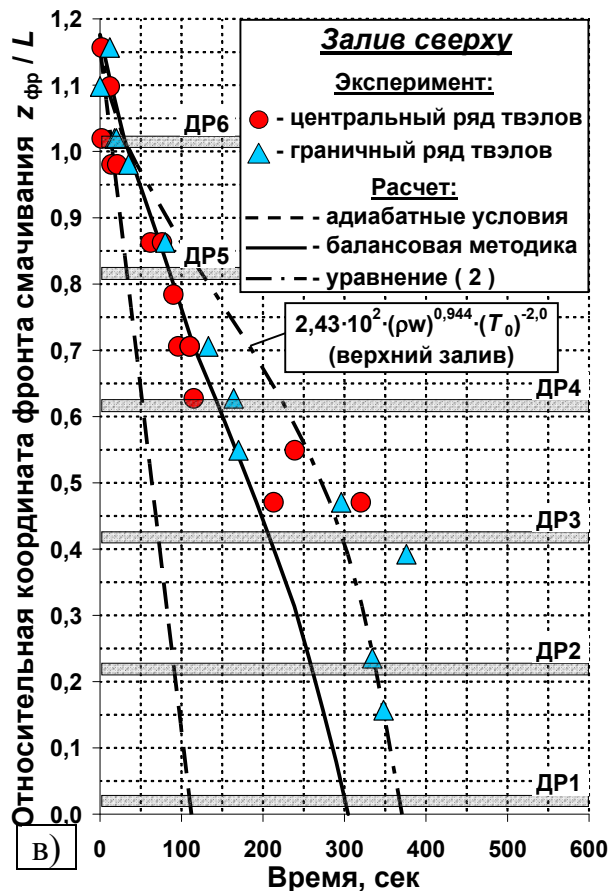
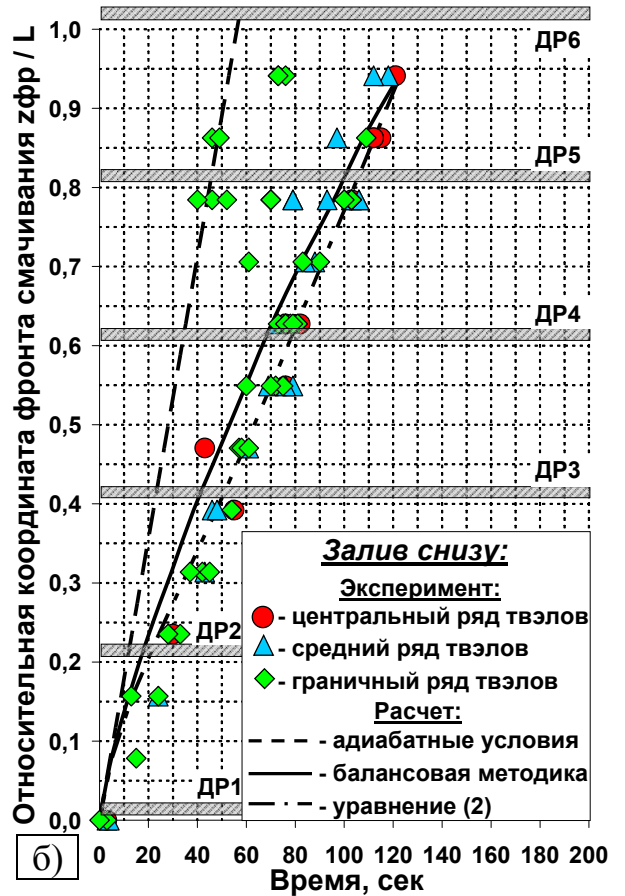
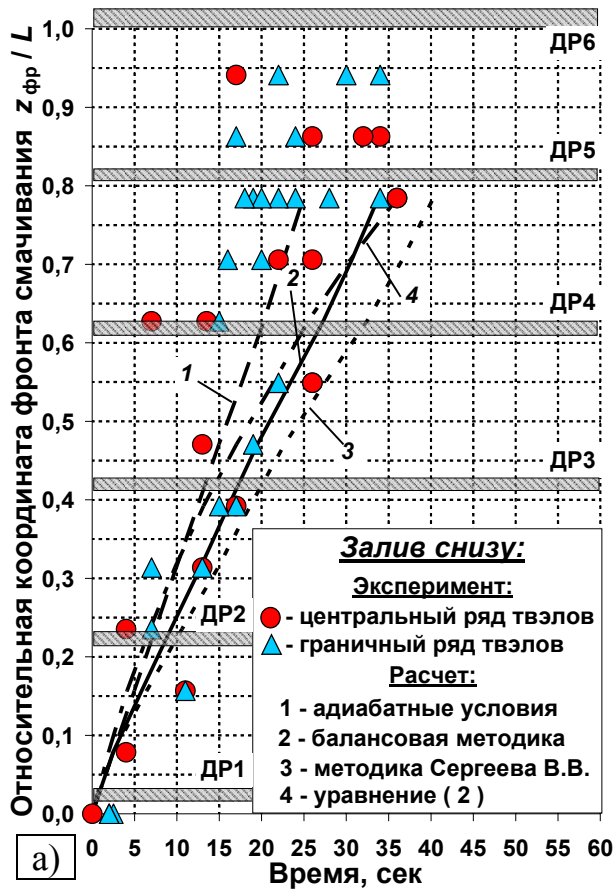
$$q_l = 0 \text{ кВт}/\text{м}$$

дающей воды в адиабатных условиях. Расхождение опытных данных и результатов расчета положения фронта смачивания одиночного имитатора твэла ВВЭР по предложенной методике не превышает 7%, а по зависимости (2), предлагаемой для модельных ТВС – 14%.

На рис. 12а÷в показаны данные по скорости фронта смачивания при заливе снизу для твэлов, расположенных в различных рядах ТВС. Как установлено, для твэлов граничного ряда $u_{фр}$ больше, чем для центрального и среднего рядов вследствие проявления в меньшей степени влияния обечайки для 37 стержневой ТВС. Сопоставляя данные, представленные на рис. 11÷12 для одиночного имитатора твэла и различных тепловыделяющих сборок, можно сделать вывод об универсальности соотношения (3) и возможности его использования для оценки времени расхолаживания модельных ТВС различной масштабности. Расчет движения фронта при подаче снизу воды по “холодной” модельной ТВС проводился с учетом изменения площади проходного сечения за счет раздутия и разгерметизации оболочек имитаторов твэлов. Согласно методике Сергеева В.В. (рис. 12а) получено завышение длительности расхолаживания ТВС до 12% в рассмотренном случае. Балансовая методика удовлетворительно предсказывает положение фронта смачивания и время расхолаживания тепловыделяющей сборки при заливе снизу (рис. 12а,б), а при заливе сверху и высоких температурах оболочек модельной ТВС ВВЭР (до 1400 °С) расхождение опытных и расчетных данных увеличивается до 40% (рис. 12в). В этом диапазоне температур экспериментальные данные лучше описываются зависимостью (2), предложенной в настоящей работе.

Выводы

1. Проведено расчетно-экспериментальное исследование повторного залива снизу (НЗ) и сверху (ВЗ) одиночных имитаторов твэлов и модельных тепловы-



(ДР1 ÷ ДР6 – дистанционирующие решетки)

а) залив снизу 19 стержневой модельной ТВС ВВЭР,

$$T_{обол}^{max} = 860 \text{ } ^\circ\text{C}, \overline{\rho w} = 42,0$$

$$\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), q_l = 2,79 \text{ кВт}/\text{м};$$

б) залив снизу 37 стержневой модельной ТВС ВВЭР,

$$T_{обол}^{max} = 970 \text{ } ^\circ\text{C}, \overline{\rho w} = 20,5$$

$$\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), q_l = 0 \text{ кВт}/\text{м};$$

в) залив сверху 19 стержневой модельной ТВС ВВЭР,

$$T_{обол}^{max} = 1370 \text{ } ^\circ\text{C}, \overline{\rho w} = 13,2$$

$$\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), q_l = 0 \text{ кВт}/\text{м}$$

Рис. 12. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по динамике фронта смачивания

деляющих сборок (ТВС) ВВЭР из штатных конструкционных элементов в условиях максимальной проектной и запроектной аварий. Получены данные по температурным режимам одиночных имитаторов твэлов при заливе снизу и 19-ти и 37-ми стержневых ТВС ВВЭР при заливе снизу и сверху из штатных конструкционных элементов на стенде ПАРАМЕТР в диапазонах изменения режимных параметров в опытах: с одиночными имитаторами – максимальная температура оболочки до залива $T_{ст0} = 760 \div 1190$ °С, расход подачи воды залива $\rho w = 12 \div 78$ кг/(м²·с), мощность, имитирующая остаточное тепловыделение, $q_l = 0 \div 4,5$ кВт/м, температура воды на входе в РУ $T_{вх} = 20$ °С; модельными ТВС ВВЭР – $T_{ст0} = 500 \div 1160$ °С (НЗ), $T_{ст0} = 460 \div 1490$ °С (ВЗ), $\rho w = 13 \div 19,5$ кг/(м²·с) (ВЗ), $\rho w = 49 \div 81$ кг/(м²·с) (НЗ), $\Delta T_{нед} = 80 \div 120$ °С. Во всех экспериментах оболочки окисленные, а в ряде - раздутые и разгерметизированные.

2. Впервые получен массив данных и обобщающее соотношение по скорости фронта смачивания одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС ВВЭР из штатных конструкционных элементов при **заливе снизу** в условиях разгерметизации и раздутия окисленных оболочек. Установлена зависимость скорости фронта смачивания от температуры оболочки, массового расхода охлаждающей воды и подведенного тепла. Показано, что на скорость фронта смачивания влияют также раздутие и разгерметизация оболочки, окисление поверхности и возможно ее изменение до 3 раз по длине и сечению модельной ТВС. Обнаружено, что в исследованных условиях $u_{фр}$ до 2÷3 раз меньше, чем по результатам расчета согласно известным соотношениям.
3. Впервые получен массив данных и обобщающее соотношение по скорости фронта смачивания модельных ТВС ВВЭР из штатных конструкционных элементов при **заливе сверху** с окисленными оболочками. Установлена зависимость $u_{фр}$ от температуры оболочки и массового расхода охлаждающей воды. Обнаружено, что влияние температуры оболочки на скорость фронта смачивания более существенно, чем при заливе снизу.
4. Полученные температурные режимы одиночных имитаторов твэлов ВВЭР в условиях МПА на стадии нагрева сопоставлены с результатами расчета по коду PARAM-TG, разработанному для расчетного сопровождения экспериментов на стенде ПАРАМЕТР. Получено удовлетворительное согласование опытных и расчетных данных по максимальной температуре оболочки и времени ее достижения.
5. Полученные температурные режимы одиночных имитаторов твэлов ВВЭР на стенде ПАРАМЕТР в условиях МПА на стадиях нагрева и повторного залива сопоставлены с результатами расчетов по кодам КАНАЛ-97,

КОРСАР/ГП, выполненных совместно с ОКБ “Гидропресс”. Обнаружено, что максимальная температура, время расхолаживания, положение фронта смачивания согласно рассмотренным кодам предсказываются удовлетворительно. Обосновано применение кодов КАНАЛ-97, КОРСАР/ГП для анализа процессов разогрева и охлаждения твэлов ВВЭР при аварии с потерей теплоносителя при изменении площади проходного сечения для теплоносителя до 5% вследствие раздутия оболочки.

6. Усовершенствована балансовая методика оценки основных характеристик расхолаживания при повторном заливе снизу или сверху одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС ВВЭР в условиях МПА и ЗПА, удовлетворительно описывающая опытные данные в диапазоне температур до 1200 °С.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. С. С. Базюк, Е.Б. Попов, Н. Я. Паршин, Ю. А. Кузма – Кичта. Исследование повторного залива модельной ТВС ВВЭР. // *Тепловые процессы в технике*, 2010 г., №12, с. 546-555.
2. С. С. Базюк, Н. Я. Паршин, Ю. А. Кузма – Кичта. Исследование скорости фронта смачивания при повторном заливе модельной тепловыделяющей сборки на стенде ПАРАМЕТР // *Труды XVII Школы-семинара мол. ученых и спец. под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева*. М.: Издательство МЭИ, 2009, т.2. с. 290-294.
3. С. С. Базюк, Ю. А. Кузма – Кичта. Моделирование повторного залива с использованием массива данных по скорости фронта смачивания модельной тепловыделяющей сборки ВВЭР // *Шестнадцатая МНТК студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика”*. Тезисы докладов. М.: Издательский дом МЭИ, 2010, т. 3, с. 65-67.
4. С.С. Базюк, Е.Б. Попов, Н.Я. Паршин, Ю.А. Кузма-Кичта. Моделирование повторного залива тепловыделяющей сборки ВВЭР // *Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5)*. М.: Издательский дом МЭИ, 2010, т. 1, с. 161-164.
5. С. С. Базюк, Ю. А. Кузма – Кичта. Исследование повторного залива модельной ТВС ВВЭР на стенде ПАРАМЕТР // *17 МНТК студ. и асп. “Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика”*. Тезисы докладов. М.: Издательский дом МЭИ, 2011, т. 3, с. 55-57.
6. С.Л. Борисов, С.И. Зайцев, М.А. Мазурин, Р.Е. Орлов, Н.Я. Паршин, Д.Н. Игнатьев, Д.М. Солдаткин, Е.Б. Попов, С.С. Базюк, Ю.А. Кузма-Кичта. Исследование повторного залива одиночного имитатора твэла ВВЭР в условиях максимальной проектной аварии. // *Труды 7ой МНТК “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, ОКБ “Гидропресс”, г. Подольск, 17-20 мая 2011 г., доклад на CD*.
7. С.С. Базюк, Ю.А. Кузма-Кичта, Р.Е. Орлов, Н.Я. Паршин, Д.М. Солдаткин, Е.Б. Попов. Расчетно-экспериментальное исследование повторного залива одиночных имитаторов твэлов и модельных ТВС ВВЭР и PWR // *Тезисы докладов XVIII Школы-семинара мол. ученых и спец. под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева*. М.: Издательство МЭИ, 2011, с. 163-164.

Подписано в печать

Л-

Печ.л. _____ Тираж _____ Заказ _____

Полиграфический центр МЭИ (ТУ), Красноказарменная, 13.