

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ УРАН-ГРАФИТОВЫХ РЕАКТОРОВ ТИПА АДЭ ПРИ АВАРИЙНОЙ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛОВ

**С.Н. Белоусов, О.Ю. Виленский, Н.Г. Кузавков, А.В. Мальков,
В.В. Петрунин, С.Ф. Шепелев**
ФГУП «ОКБМ», г. Н.Новгород



В статье представлены результаты численного и экспериментального моделирования аварийных ситуаций с разгерметизацией технологических каналов (ТК) промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР) АДЭ-2, АДЭ-4, АДЭ-5. Изложена принятая концепция прохождения аварийных ситуаций, методология и средства численного и экспериментального исследования аварийных процессов: математическая модель, компьютерная программа RFCD, разработанный и изготовленный в ОКБМ экспериментальный стенд. Представлены результаты численного анализа процессов в сравнении с результатами экспериментальных исследований, выполненных для натурных условий: диапазон температур имитаторов графитовых втулок и блоков составляли 300-550°C при наличии в области разгерметизации ТК ударных пульсаций давления и расхода с амплитудой ~ 10 МПа и частотой ~ 100 Гц, полученных предварительно в численном эксперименте по программе RFCD. Разработанная программа RFCD и созданный экспериментальный стенд могут также использоваться для анализа безопасности канальных реакторов РБМК.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленные уран-графитовые реакторы (ПУГР) АДЭ-2, АДЭ-4, АДЭ-5 более 40 лет работают в режиме АТЭЦ, обеспечивая электро- и теплоснабжение Северска, Томска и Железногорска. Реакторы АДЭ принадлежат к поколению конца 50-х – начала 60-х годов. Поэтому обоснование безопасной эксплуатации этих реакторов является важнейшей задачей.

При обосновании безопасности реакторов АДЭ одной из сложнейших в методологическом плане проблем являются аварийные ситуации с единичной и множественной разгерметизацией технологических каналов (ТК). Анализ происходящих при этом процессов проводится расчетными и экспериментальными методами.

© С.Н. Белоусов, О.Ю. Виленский, Н.Г. Кузавков, А.В. Мальков, В.В. Петрунин, С.Ф. Шепелев, 2006

Для расчетного анализа динамики параметров среды, истекающей из первого контура в разогретую до высоких температур графитовую кладку активной зоны (АЗ) при разгерметизации ТК, разработана расчетная программа RFCD [1, 2], с использованием которой проведены расчеты аварийных ситуаций с единичной и множественной разгерметизацией ТК.

Разработан и изготовлен экспериментальный стенд, предназначенный для верификации расчетных программ и экспериментального обоснования безопасности реакторов АДЭ. Проведены экспериментальные исследования [2].

Изложение полученных результатов представляет значительный интерес при исследовании и обосновании безопасности уран-графитовых реакторов, охлаждаемых водой.

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРОВ АДЭ

На всех стадиях разработки, пуска и эксплуатации промышленных реакторов вопросам обеспечения безопасности уделялось особое внимание. Анализировались отказы оборудования, ошибки персонала, фактическое состояние систем и оборудования. Разработаны и внедрены в проектах реакторов технические мероприятия по повышению надежности и безопасности эксплуатации, в частности, быстродействующая система аварийной защиты реактора, система технических мер по стабилизации графитовой кладки АЗ и др. Указанные мероприятия обеспечили безопасную эксплуатацию реакторов в течение ~ 40 лет, что почти в два раза превышает проектный срок службы.

В анализе безопасности реакторов АДЭ особое место занимают аварийные ситуации с разгерметизацией ТК. При расчетном и экспериментальном обосновании безопасности реакторов АДЭ в аварийных ситуациях с разгерметизацией ТК необходимо моделировать следующие процессы (рис. 1):

- истечение воды первого контура в разогретую до высокой температуры графитовую кладку АЗ реактора;

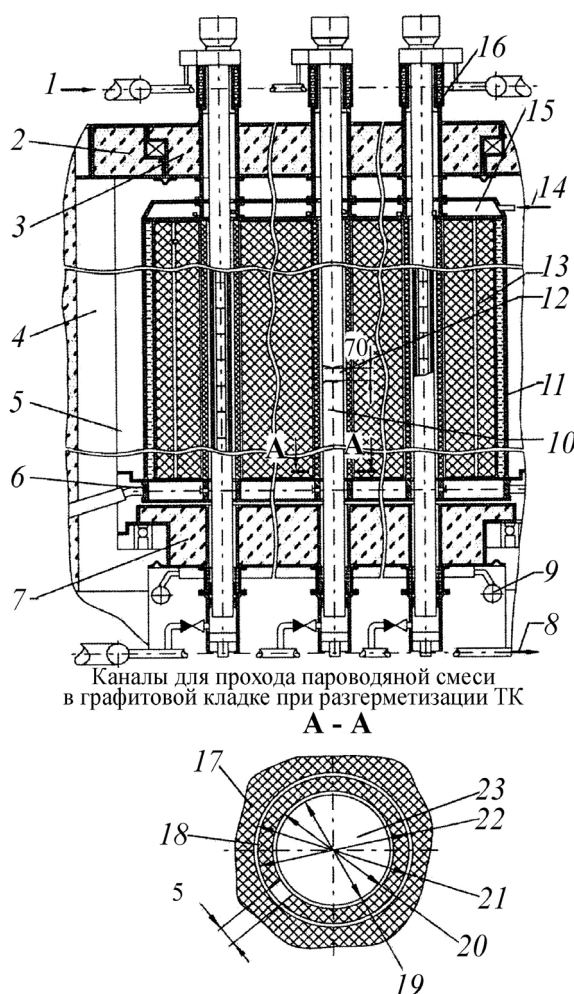


Рис.1. Схема РП реакторов АДЭ, используемая при анализе аварийных ситуаций с разгерметизацией ТК: 1 – вход воды первого контура; 2 – схема «Д»; 3 – схема «Е»; 4 – схема «Л»; 5 – РП; 6 – МДП (междиафрагменное пространство); 7 – схема «ОР»; 8 – выход воды первого контура; 9 – отсос пара; 10 – аварийный ТК; 11 – кожух АЗ; 12 – область разгерметизации ТК; 13 – зазор между графитовыми блоками; 14 – подача азота в графитовую кладку; 15 – азотный коллектор; 16 – уплотнение ТК; 17 – графитовый блок; 18 – графитовая втулка; 19 – диаметр ТК; 20 – диаметр втулки внутренний; 21 – диаметр отверстия в блоке; 22 – диаметр втулки наружный; 23 – ТК

- пульсации расхода и давления сред в ТК и полостях кладки;
- парообразование в полостях графитовой кладки и локальное повышение давления;
- торможение и перераспределение расходов сред в разгерметизированном ТК и каналах в кладке АЗ;
- распространение пароводяной смеси и пара по полостям кладки и выход в реакторное пространство (РП);
- рост давления, вызванный генерацией пара;
- воздействие сред на реакторные конструкции.

ПРОГРАММА RFCD ДЛЯ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ С РАЗГЕРМЕТИЗАЦИЕЙ ТК

Расчетная программа RFCD [1] разработана для расчетного анализа безопасности ПУГР типа АДЭ в аварийных ситуациях с разгерметизацией ТК и позволяет проводить расчеты динамики однофазных и двухфазных водяных потоков, включая быстрые динамические процессы типа гидравлического удара с учетом теплообмена со стенками каналов на расчетных участках и изменения во времени температуры графитовой кладки АЗ и металлоконструкций РП.

Математическая модель и алгоритм программы RFCD [1] основаны на численном решении нестационарных уравнений сохранения массы, энергии и количества движения для однофазных и двухфазных потоков в переменных Эйлера путем разбиения расчетной области на конечные элементы. При анализе аварийных ситуаций АЗ и РП разбиваются на конечное число контрольных объемов, соединенных каналами, для которых рассчитывается динамика значений параметров парожидкостных и парогазовых сред.

Компьютерный код RFCD позволяет задавать произвольную конфигурацию расчетной схемы. Могут задаваться расчетные схемы замкнутых контуров с естественной или принудительной циркуляцией теплоносителя, либо разомкнутые расчетные схемы моделируемых объектов с заданными граничными условиями.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ РАСЧЕТНЫХ ПРОГРАММ

Стенд создан для обоснования безопасности реакторов АДЭ в аварийных ситуациях с разгерметизацией ТК и предназначен для экспериментальной апробации и верификации расчетных программ. Целью экспериментальных работ на стенде является исследование распределения значений расходов рабочей среды, истекающей в ячейку АЗ реакторов АДЭ при разгерметизации ТК, определение значения давления в области разгерметизации, исследование функционирования обратного клапана на выходе ТК и изменения расхода в нижней части разгерметизированного ТК.

Стенд моделирует ячейку АЗ реактора. Имитация аварийных режимов с разгерметизацией ТК на стенде проводится для уровней и диапазонов изменения исследуемых параметров, соответствующих предварительно выбранным значениям для моделирования аварийных ситуаций с разгерметизацией ТК с помощью программы RFCD. Принципиальная схема компоновки основного оборудования стенда, конструктивная схема модели ячейки реактора и сравнительные схемы течения сред при разгерметизации ТК в натурном объекте и модели стенда приведены на рис. 2–4.

Для имитации режимов разгерметизации ТК стенд имеет следующие основные системы и сборочные единицы:

- модель ячейки АЗ реакторов АДЭ в пределах активной зоны (рис. 2, 3), состоя-

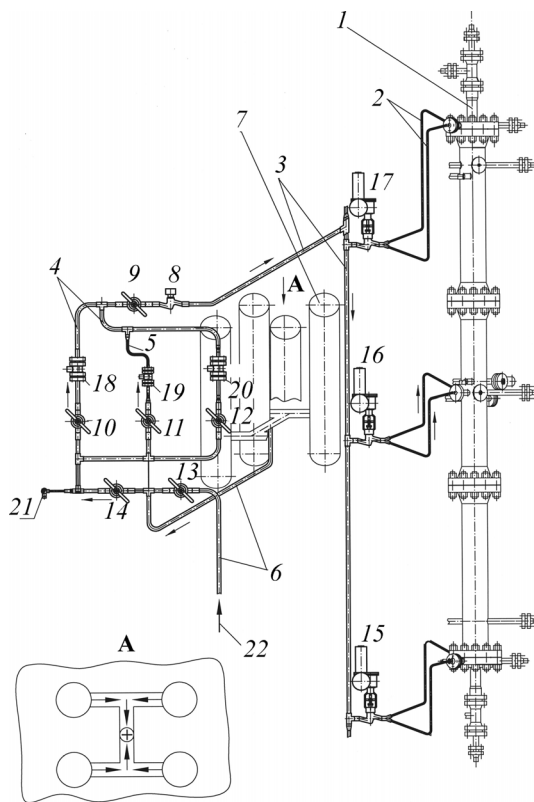


Рис. 2. Гидравлическая схема и компоновка оборудования трассы подвода воды в модель ячейки активной зоны экспериментального стенда: 1 – модель ячейки АЗ реактора; 2, 3, 4, 5, 6 – трубопроводы; 7 – водоподогреватель; 8 – клапан обратный; 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 – управляемая, регулирующая и запорная арматура; 18, 19, 20 – турбинные преобразователи расхода воды; 21 – термопара; 22 – подача воды от насоса

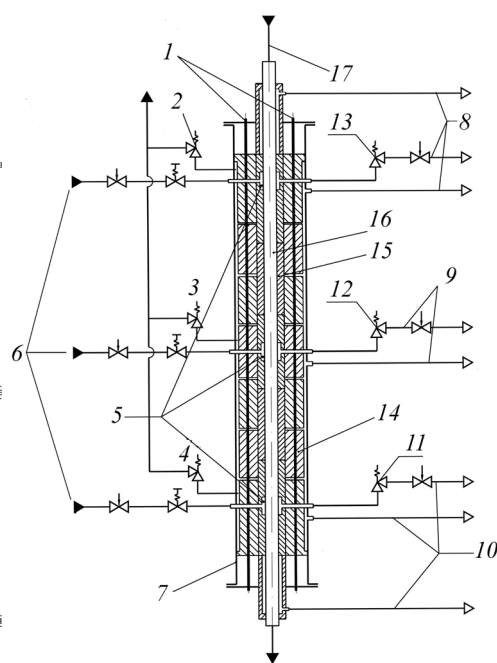


Рис. 3. Конструктивная схема модели ячейки АЗ реактора экспериментального стенда:
1 – электрический нагреватель;
2, 3, 4 – предохранительные клапаны; 5 – узлы имитации разгерметизации ТК; 6 – подвод воды в модель; 7 – силовой корпус; 8, 9, 10 – отвод рабочей среды из модели в конденсатор и через ИК; 11, 12, 13 – импульсные клапаны; 14 – имитатор графитовых блоков; 15 – имитатор графитовых втулок; 16 – имитатор ТК; 17 – вода от системы горячего водоснабжения

щую из имитатора трубы ТК, имитаторов графитовых втулок и блоков, силового корпуса, в который заключена модель ячейки;

- устройства для имитации процесса разгерметизации ТК (узлы ИРТК), позволяющие моделировать натурные условия протекания процесса по геометрии области разгерметизации, температуре и давлению без физической разгерметизации имитатора трубы ТК – путем подачи рабочей среды в модель ячейки активной зоны под заданным давлением (рис. 2, 3); на рис.4 приведены сравнительные схемы течения потоков в натурном объекте и модели;
- нагреватель модели (рис. 3), имитирующий тепловыделения в графите АЗ реактора;
- систему охлаждения имитатора ТК, обеспечивающую поддержание заданной температуры трубы ТК и натурные условия теплоотвода от имитаторов графитовых втулок и блоков кладки;
- трассу подвода воды в модель ячейки АЗ (рис. 2, 3);
- емкости с запасом рабочей среды с заданными параметрами – водоподогреватели (рис. 2);
- систему газа высокого давления, обеспечивающую поддержание давления воды в водоподогревателях на уровне давления в первом контуре реакторной установки;
- систему, имитирующую функционирование обратного клапана на выходе из ТК и

Таблица 1

Технические характеристики стенда

Наименование параметра	Числовое значение
Мощность нагревателя модели ячейки реактора, кВт	35 – 40
Мощность нагревателей в емкостях запаса воды, кВт	40 – 50
Средняя температура поверхности трубы имитатора ТК, °C	150
Внутренний диаметр корпуса модели ячейки реактора, м, не более	0,15
Высота имитаторов графитовых втулок и кладки, м	3,5
Температура имитаторов графитовых втулок, °C	50 – 550
Температура имитаторов графитовой кладки, °C	50 – 650
Температура корпуса модели, °C	50 – 570
Давление пароводяной смеси в модели ячейки реактора, МПа	0,1-4,0
Температура пароводяной смеси, пара на выходе из модели, °C	100 – 470
Давление срабатывания клапанов, имитирующих обратный клапан на выходе из ТК, МПа	2,3-0,75
Объем воды в водоподогревателях, дм ³	200
Температура воды в водоподогревателях, °C	20-200
Давление воды в водоподогревателях, МПа	0,75 – 4,0
Давление в газовых баллонах системы подачи газа в водоподогреватели давления, МПа	0,1 – 15
Расход воды, подаваемый в модель ячейки реактора ТК, т/ч	0,18 – 5,76

изменение расхода в нижней части ТК при прохождении режимов с разгерметизацией ТК, – систему отвода рабочей среды из модели через импульсный клапан (рис. 3, 4);

- систему отвода среды из модели ячейки и конденсации пароводяной смеси при имитации режимов с разгерметизацией ТК (рис. 3);
- системы подпитки и дренажа циркуляционных контуров стенда;
- трубопроводы с быстродействующей управляемой, регулирующей и запорной арматурой, импульсными (ИК) и предохранительными (ПК) клапанами (рис. 2, 3).

Основные технические характеристики стенда приведены в табл. 1.

При имитации режимов разгерметизации ТК вода из водоподогревателей по трассе подвода

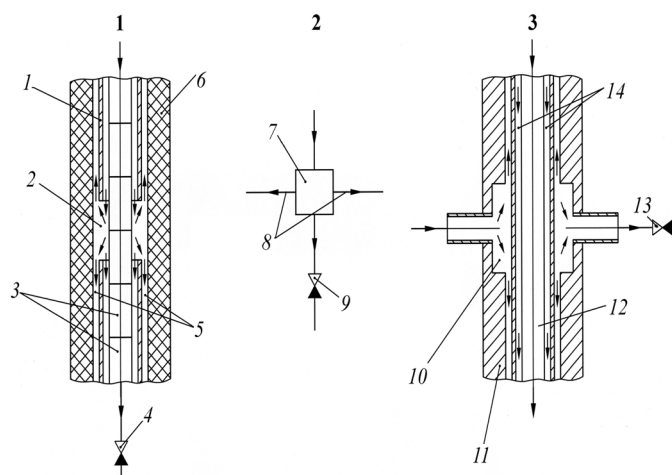


Рис. 4. Узел разгерметизации ТК:

1 – конструктивная схема в реакторе: 1- труба ТК; 2 – полость разгерметизации; 3 – твэл; 4 – обратный клапан на выходе ТК; 5 – каналы течения рабочей среды в графитовой кладке; 6 – графитовая кладка; 2 – схема течения рабочей среды: 7 – полость разгерметизации ТК; 8 – каналы течения рабочей среды в графитовой кладке; 9 – обратный клапан на выходе ТК; 3 – конструктивная схема в модели стенда: 10 – имитатор полости разгерметизации ТК; 11 – имитатор графитовой кладки; 12 – имитатор ТК; 13 – имитатор обратного клапана; 14 – имитаторы каналов течения рабочей среды в графитовой кладке

воды в узлы ИРТК подается в разогретую до заданной температуры модель. Из модели рабочая среда отводится по трассам отвода среды в конденсатор и через импульсный клапан (рис. 3).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ С РАЗГЕРМЕТИЗАЦИЕЙ ТК НА СТЕНДЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ RFCD

Предварительный расчетный анализ аварийных ситуаций с разгерметизацией ТК и экспериментальных режимов на стенде показал, что при разгерметизации ТК в натурном объекте или при имитации процесса разгерметизации ТК на стенде поступление воды в область разгерметизации ТК характеризуется наличием пульсаций расхода и ударных пульсаций давления воды.

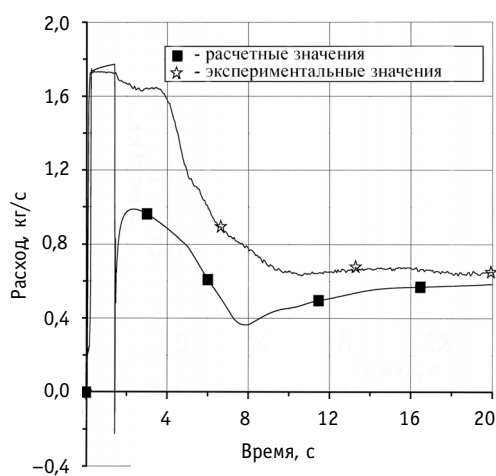


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные значения расхода среды в стенде

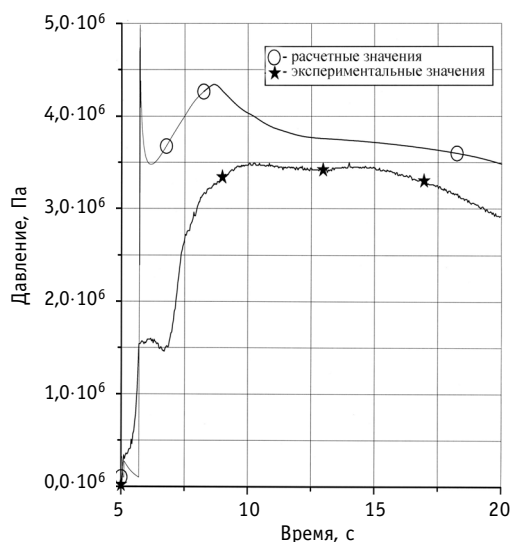


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные значения давления в нижнем узле ИРТК модели ячейки реактора стенда

На этапе предварительного расчетного анализа выполнено обоснование разбиения моделируемого объекта на расчетные участки и контрольные объемы, анализ величин максимальных отклонений моделируемых параметров, оценка сходимости и устойчивости численных решений, определено влияние шага интегрирования и нодализации расчетной области на результаты расчета, проведены расчетные и аналитические тесты для обоснования расчетной программы в том числе и для расчетов гидравлического удара без разрыва и с разрывом сплошности потока.

С целью верификации программы на экспериментальном стенде, в том числе и на наличие пульсаций давления воды в области разгерметизации ТК, на трассе подвода воды, перед входом в модель были установлены датчики для измерения пульсаций давления ALPHA N500. Сигналы от датчиков выведены на компьютер для цифровой записи и на осциллограф для аналоговой записи процессов. При цифровой записи интервал времени между опросами значений давления и других параметров составлял 0,067 с.

В процессе исследования прохождения аварийных ситуаций с разгерметизацией ТК проведена серия бросков воды под давлением в разогретую до рабочих параметров модель стенда (температура имитаторов графитовых втулок в центре модели изменялась в диапазоне 300–550°C, давление воды в водоподогревателях составляло 3–5 МПа). Подача воды в модель осуществлялась через нижний,

средний и верхний узлы ИРТК, отвод среды из модели на конденсатор производился из верхней и нижней точек модели и через ИК.

Выполнен расчетный анализ экспериментальных режимов по программе RFCD.

Ниже представлен один из проведенных режимов броска воды в разогретую до рабочих параметров модель. В рассматриваемом режиме исходные параметры перед броском воды в модель имели следующие значения:

- давление газа в водоподогревателях 4,93 МПа;
- температура воды в водоподогревателях 19°C;
- температура имитаторов графитовых втулок в центре модели 355°C;
- давление паровоздушной смеси за запорным вентилем ВН37 0,1 МПа (рис. 2).

Бросок воды из водоподогревателей в модель проводился путем открытия вентиля ВН37 (время полного открытия вентиля составляло ~ 2 с). Вода по трассе подвода подавалась в нижний узел ИРТК, отвод пара на конденсатор производился из верхней точки модели. Экспериментальные и расчетные результаты динамики изменения давления и расхода среды в трассе подвода воды в модель приведены на рис. 5–8. В процессе открытия арматуры ВН37 расход в трассе практически мгновенно (за промежуток времени ~ 0,1 с) возрастает до значения 1,75 кг/с (рис. 5, расчетные и экспериментальные данные). Максимальное значение расхода воды в расчете и эксперименте поддерживается в течение промежутка времени ~ 1,3 с. В процессе заполнения трассы подвода и поступления рабочей среды в обогреваемые каналы модели в имитаторе графитовой кладки происходит торможение потока рабочей среды и, соответственно, снижение значений ее расхода. К моменту времени 10 с (рис. 5, расчетная и экспериментальная кривые), ее расход снижается до своего квазистационарного значения 0,43 кг/с, в соответствии с расчетом, и до 0,63 кг/с, в соответствии с экспериментом. К моменту времени 20 с расчетное и экспериментальное значения расхода среды составляют ~ 0,6 кг/с.

На рис. 6 приведены расчетные и экспериментальные значения давления в трассе подвода воды в модель в точке установки датчиков давления ALPHA N500.

При резком возрастании расхода воды до максимального значения в течение первых секунд процесса происходит незначительный рост давления в стенде до значения ~ 0,25 МПа за счет сжатия движущимся фронтом воды паровоздушной смеси (рис. 6, расчетные и экспериментальная кривые). Продолжение роста давления от сжатия паровоздушной смеси ограничено конденсацией пара. Рост давления до квазистационарного значения 3,4 МПа в эксперименте и 4,0 МПа в расчете к десятой секунде процесса вызван торможением потока при входе в обогреваемые каналы модели ячейки реактора.

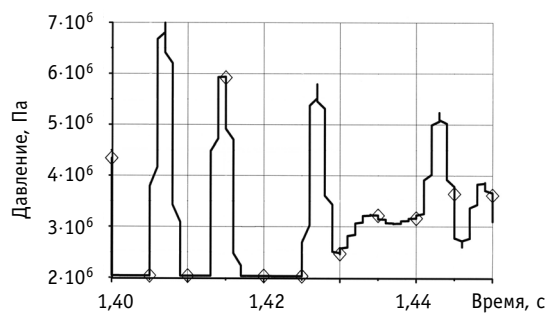


Рис. 7. Пульсации давления воды в трассе подвода воды в модель (расчет по программе RFCD)

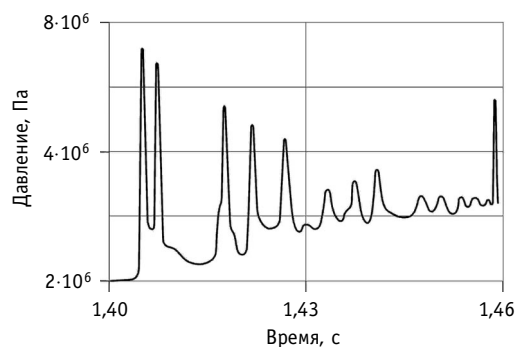


Рис. 8. Пульсации давления воды в трассе подвода воды в модель (эксперимент)

Процесс стабилизации значений давления и расхода рабочей среды при поступлении в обогреваемые каналы модели сопровождается пульсациями их значений (рис. 5, 6, расчетные кривые). Отсутствие пульсаций давления на экспериментальной кривой (рис. 6) объясняется низкой частотой опроса при цифровой записи экспериментальных значений давления. Пульсации давления, полученные расчетным путем, во временном интервале 1,4–1,45 с приведены на рис. 7. Данные пульсации давления зарегистрированы экспериментально при аналоговой записи экспериментальных данных (рис. 8).

Как видно из приведенных расчетных и экспериментальных результатов, максимальная амплитуда пульсаций давления среды составляет ~ 7 МПа, а частота ~ 100 Гц.

Из проведенного сравнительного анализа следует, что имеется хорошее качественное соответствие расчетных и экспериментальных данных. Различие результатов на стадии стабилизации процесса не превышает 15–20%. На первой стадии броска воды, при прохождении быстрых динамических процессов, расхождение расчета и эксперимента может достигать 50% (рис. 5). Расчетные и экспериментальные значения пульсационных характеристик давления (рис. 7, 8), практически, совпадают как по амплитуде, так и по частоте.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТК В РЕАКТОРАХ АДЭ

Проведены расчеты по программе RFCD аварийных ситуаций с единичной и множественной разгерметизацией ТК в реакторах АДЭ. Расчеты аварийной ситуации с единичной разгерметизацией ТК в предположении мгновенной разгерметизации ТК полным сечением показали наличие в области разгерметизации ТК пульсаций расхода и давления среды.

При мгновенной разгерметизации ТК-натяжителя (ТК-Н) полным сечением, в результате мгновенного расхождения образовавшихся верхней и нижней половин трубы ТК-Н под действием усилия пружины на расстояние 70 мм, образуется полость в графитовой кладке АЗ, куда начинает истекать вода и пароводяная смесь из аварийного ТК (рис. 1).

В образовавшуюся полость разгерметизации истекает расход рабочей среды из верхней половины разгерметизированного ТК. Поскольку на начальном этапе процесса давление в полости разгерметизации существенно ниже давления воды на выходе ТК, в полость разгерметизации ТК истекает расход среды из нижней половины разгерметизированного ТК.

Течение среды из полости разгерметизации ТК в аксиальном направлении вверх и вниз осуществляется по каналам в графитовой кладке, показанным на рис. 1, А-А:

- прямоугольный канал в прорези графитовой втулки;
- кольцевой канал между трубой ТК и графитовой втулкой;

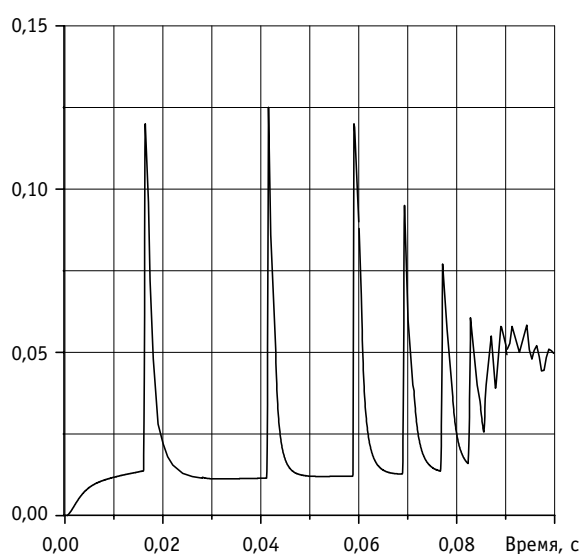


Рис. 9. Расход рабочей среды в графитовой кладке

- кольцевой канал между графитовой втулкой и графитовыми блоками.

Значения расхода среды, текущей из полости разгерметизации вверх по вертикальному каналу, образованному прорезью в графитовой втулке, показаны на рис. 9. Суммарное значение расходов среды, текущих по каналу в прорези графитовой втулки вверх и вниз составляет ~ 85% от суммарного значения расхода среды, текущего в аксиальном направлении из полости разгерметизации ТК.

На промежутке времени 0,016 с расход среды, вытекающий из полости разгерметизации ТК по каналу в графитовой втулке вверх по отношению к полости разгерметизации, составляет ~ 0,017 кг/с. Существенное превышение втекающего в полость разгерметизации ТК расхода среды над вытекающим расходом и инерционность названных потоков среды приводит к скачкообразному повышению давления в полости разгерметизации в момент времени 0,016 с (рис. 10). Давление повышается до значения 18,0 МПа. Длительность скачкообразного повышения давления составляет ~ 0,0016 с. Возникший скачок давления носит характер гидравлического удара и приводит к резкому увеличению значения расхода среды, вытекающего в графитовую кладку (рис. 9). Данный процесс носит циклический характер с частотой ~ 120 Гц, максимальное повышение давления при этом составляет 19,0 МПа. Затем, к моменту времени ~ 0,11 с, значения названных расходов среды выходят на квазистационарный уровень и давление в полости разгерметизации ТК стабилизируется при значении 3,0 МПа. При повышении давления среды в полости разгерметизации ТК выше значения давления воды на выходе из ТК вытекающий в нее расход среды из верхней половины ТК вытекает как в графитовую кладку, так и в нижнюю половину разгерметизировавшегося ТК.

Различие значений амплитуд пульсаций давления в узле ИРТК модели стенда и в области разгерметизации натурного объекта обусловлено наличием в модели стенда технологических протечек рабочей среды.

Оценки прочности графитовых втулок и блоков в районе разрыва показали, что выброс среды из ТК с давлением, представленным на рис. 10, может привести к разрушению двух-трех втулок, а затем к возникновению в одном-двух смежных блоках внутренних продольных трещин, которые лавинообразно прорастут до сквозных и фрагментируют блок на две – четыре части. При этом, если колонна с фрагментируемым блоком находится в районе так называемого «кривораздела» шириной более 100 мм, возможно выпадение одного-двух фрагментов в пустоты кладки и появление в этом месте так называемых «храповиков». Под действием импульсного давления фрагментированные части блока ударят в блоки соседних колонн и попытаются дополнительно искривить колонны от места разгерметизации ТК в сторону бандажей и кожуха, что приведет к дополнительным локальным деформациям кожуха величиной не более 10 мм. Оценки показали, что дополнительная деформация кожуха и соответствующее ему искривление колонн не приведет к разгерметизации соседних ТК. Таким образом, мгновенная разгерметизация единичного ТК полным сечением не приведет к лавинообразному развитию аварийного процесса в объеме кладки реактора. Для окончательных выводов требуется проведение более детальных расчетных

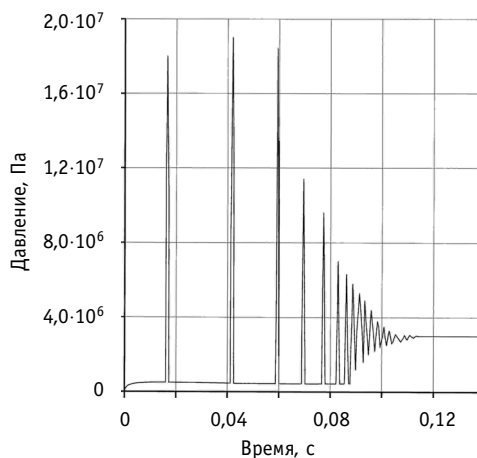


Рис. 10. Давление рабочей среды в области разгерметизации ТК

исследований с использованием специальных программных средств расчета прочностных параметров кладки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана расчетная программа RFCD для анализа аварийных ситуаций с разгерметизацией ТК промышленных уран-графитовых реакторов типа АДЭ, позволяющая проводить расчеты динамики параметров однофазных и двухфазных водяных потоков, включая быстрые динамические процессы типа гидравлического удара с учетом теплообмена со стенками каналов на расчетных участках и изменения во времени температуры графитовой кладки АЗ и металлоконструкций РП.

Предварительный расчетный анализ аварийных ситуаций с разгерметизацией ТК показал наличие в области разгерметизации ударных пульсаций давления с амплитудой до 19 МПа.

Для верификации программы изготовлен экспериментальный стенд, моделирующий ячейку АЗ реактора. Моделирование разгерметизации ТК на стенде проводится без физической разгерметизации модели ТК, что обеспечивает повторяемость эксперимента при минимальных затратах, проведение необходимого количества экспериментальных режимов для заданных серий значений режимных параметров и набор экспериментальных данных для верификации программы. Полученные на стенде экспериментальные динамические характеристики с достаточной степенью точности совпадают с расчетными зависимостями, включая ударные пульсации давления среды в области разгерметизации ТК.

По результатам экспериментальных исследований на стенде и верификации программы RFCD выполнен расчетный анализ истечения теплоносителя в графитовую кладку реакторов АДЭ и изменения давления в РП при единичной и множественной разгерметизациях ТК.

Анализ воздействия ударных пульсаций давления на графитовую кладку показал, что несмотря на то, что при разгерметизации ТК возможно разрушение графитовых втулок и блоков, разгерметизация единичного ТК не приведет к лавинообразному развитию аварийного процесса в объеме кладки реактора.

Разработанная программа RFCD и созданный экспериментальный стенд могут также использоваться для анализа безопасности канальных реакторов РБМК.

Литература

1. Белоусов С.Н., Кузнецова Н.А. и др. Разработка и верификация кода RFCD для расчета процесса истечения пароводяной смеси при разгерметизации технологических каналов канальных водо-графитовых реакторов /Сборник тезисов докладов на отраслевой конференции «Теплофизика-2001». – Обнинск, 2001. – 300 с.
2. Белоусов С.Н., Кузавков Н.Г., Петрунин В.В. и др. Расчетно-экспериментальные исследования аварийных процессов при разгерметизации технологических каналов промышленных уран-графитовых реакторов типа АДЭ/Сборник тезисов докладов на Международной научно-технической конференции. – М.: ГУП НИКИЭТ, 2004.

Поступила в редакцию 11.04.2006

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039:37

Russian Center of Nuclear Science and Education is the Way of Nuclear Engineering Skilled Personnel Training \V.M. Murogov, N.L. Salnikov; – Obninsk, 2006. – 11 pages, 1 illustration, 2 tables.

Nuclear power engineering as the key of nuclear technologies is not only the element of the power market but also the basis of the country's social-economic progress. The defenses, engineering, medicine, science, industry based on nuclear technologies are the way to highly developed country. And the problem of knowledge conversation and transmitting to new generations is the one of knowledge transmitting to developing countries.

The creation of science-research centers consolidating nuclear science and education leads to safeguarding of stability and security in Russia.

Obninsk as the first science town in Russia is the ideal place for the creation of integrated Science-Research Center of Nuclear Science and Technologies – The Russian Center of Nuclear Science and Education («Center» for conservation and development of nuclear knowledge. On the base of Obninsk education and science organizations and State Center «Kurchatov Institute» there was created the Russian Association of Nuclear Science and Education for carrying out of the scientific session with World Nuclear University and IAEA «The role of nuclear technologies in society of XXI century».

УДК 621.039.58: 621.039.52

Computational and Experimental Investigations for Safety Substantiation of ADE-Type Commercial Uranium-Graphite Reactors in Case of Emergency Depressurization of Fuel Channels \S.N. Belousov, O.Yu. Vilensky, N.G. Kuzavkov, A.V. Malkov, V.V. Petrunin, S.F. Shepelev; – Obninsk, 2006. – 10 pages, 10 illustrations, 1 table. – References, 2 titles.

The paper presents the results of computational and experimental simulation of emergencies with depressurization of fuel channels of ADE-2, ADE-4, ADE-5 production uranium-graphite reactors (PUGR). The adopted concept of emergency progress, methodology and equipment for computational and experimental investigation of emergencies are described: mathematic model, RFCD computer code, and experimental test facility developed and fabricated in OKBM. The results of analyses and full-scale experiments are compared: temperature range of graphite sleeve and block simulators is 300-550°C with impact pressure and flow pulsation with amplitude of ~ 10 MPa and frequency of ~ 100 Hz in depressurization area, which were obtained during preliminary analysis using RFCD computer code. The developed RFCD code and test facility can be also used to analyze safety of pressure-tube reactor (RBMK).

УДК 621.039.7

Generalization of Risk Concept in Case Risk Components Depend on Time \Yu. V. Volkov; – Obninsk, 2006. – 6 pages, 1 illustration, 1 table. – References, 9 titles.

Ratios of risk assessments vs. nuclear technologies objects have been obtained for cases when such risk components as accident probability and the consequent damage depend on time.

Such generalization of risk concept brings about new possibilities for performing PSA which have been demonstrated with simple models in the present work.

As an example safety of radwaste storage with monopropellant activity has been analyzed with a very simple model.

УДК 621.039.58: 519.873

Generalization of Mathematical Model of Reliability of the Complex «Protection Object – Control and Protection System» \A.I. Pereguda, R.E. Tverdohlebov; – Obninsk, 2006. – 10 pages, 9 illustrations. – References, 5 titles.