

Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"
Институт реакторных материалов и технологий (КЦЯТ)

На правах рукописи

Алексеев Петр Викторович

**РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ
ПОВРЕЖДЕНИЙ КОРПУСА КОЛЛЕКТОРА ПАРОГЕНЕРАТОРА
ПГВ-1000 В ВЕРОЯТНОСТНОЙ ПОСТАНОВКЕ**

Специальность 05.14.03 – ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Институте реакторных материалов и технологий (КЦЯТ)
национального исследовательского центра "Курчатовский институт"

Научный руководитель: доктор технических наук , профессор
Тутнов Александр Александрович
зам. директора ИРМТ КЦЯТ
НИЦ "Курчатовский институт"

Официальные оппоненты: доктор технических наук , профессор
Гетман Александр Федорович
ВНИИАЭС, главный научный сотрудник

кандидат технических наук
Ткачев Владимир Валентинович
отдел канальных реакторов ИАС КЦЯТ
НИЦ "Курчатовский институт", начальник лаборатории

Ведущая организация: ОАО "ОКБМ Африкантов"
г. Нижний Новгород

Защита состоится _____ в _____ часов _____ минут на заседании
диссертационного совета _____ в НИЦ "Курчатовский институт" по
адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке НИЦ
"Курчатовский институт"

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь диссертационного совета _____

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время остро стоит вопрос безопасной эксплуатации, как отечественных, так и зарубежных ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Это связано с тем, что, несмотря на постоянное совершенствование действующих нормативных документов и методов обоснования безопасности, имеют место периодические отказы оборудования и, как следствие, аварии различного масштаба. Проведение полномасштабных реакторных исследований и испытаний конструкций и узлов оборудования ЯЭУ, направленных на обоснование их работоспособности и надежности сопряжено со значительными трудностями и финансовыми затратами, как на стадии проектирования и изготовления, так и на стадии эксплуатации. Поэтому число их невелико, а существенное наращивание объема реакторных экспериментов, в обозримом будущем, по экономическим соображениям, маловероятно. Иначе выглядит сложившаяся на сегодняшний день ситуация в области вычислительного эксперимента, где прослеживается постоянная тенденция к росту мощностей и снижению стоимости электронных вычислительных машин. Все это делает актуальными различные методы моделирования процессов эксплуатации реакторных установок (РУ) с использованием компьютерных программ, учитывающих большое число исходных данных и отображающих реальные физические процессы с большой степенью достоверности. Наиболее перспективными из последних являются методы моделирования с использованием вероятностного подхода, в которых неопределенности процессов, связанные с несовершенством средств и методов натуральных испытаний и неточностью представлений о физике реальных явлений, нивелируются, путем использования распределений механических характеристик и эксплуатационных параметров, в рамках вероятностных подходов оценки прочности и долговечности конструкций.

Кроме того, действующие руководящие документы, используемые при расчетах на прочность оборудования и трубопроводов ЯЭУ, устанавливают предельно допустимую вероятность возникновения аварии, некомпенсируемой

штатной системой безопасности, равную 10^{-7} (1/год) на установку. Указанное требование нормативных документов, наряду с необходимостью снятия излишнего консерватизма расчетных обоснований прочности конструкций, в том числе и коллекторов парогенераторов (ПГ) типа ВВЭР-1000, определяет актуальность темы диссертации, направленной на создание расчетного инструмента для доказательства маловероятного (гипотетического) характера отказов, недопустимых с точки зрения обеспечения безопасности ЯЭУ.

Степень разработанности темы исследования

Проблема моделирования повреждаемости элементов конструкции ЯЭУ изучается давно. За это время были разработаны методики и расчетные коды, позволяющие моделировать процессы повреждения элементов конструкций с учетом различных механизмов разрушения, а также оценить их надежность и долговечность. Основные существующие методики подробно рассмотрены в работе. Однако стоит заметить, что большинство из них являются "незавершенными" с точки зрения применимости на практике для обоснования надежности элементов конструкции реакторных установок. Наибольшую практическую ценность представляют собой вероятностные методики моделирования, созданные на основе метода пересечения статистических величин. К таким методикам в частности относится комплекс алгоритмов, реализованный в расчетных кодах МАВР-1.1, МАВР-2.1. Однако, на сегодняшний день, указанные методики устарели в связи с большим прогрессом за последние 20 лет в совершенствовании механики разрушения и изменением нормативной базы. Подводя итог, можно сказать, что, несмотря на множество существующих, на сегодняшний день, методов моделирования повреждаемости и оценки надежности конструкций, завершеного инструмента для обоснования безопасной эксплуатации реакторных установок, отвечающего современным достижениями механики разрушения и требованиям актуальных руководящих документов, не существует.

Цели и задачи работы

Целью проводимых в диссертации исследований является решение следующих задач:

1. Разработка комплекса методик для моделирования повреждаемости корпусов коллекторов ПГ.

Для достижения этой цели потребовалось:

- разработать методику моделирования зарождения новых дефектов в процессе эксплуатации;
- разработать методики вычисления критических размеров трещин в соответствии с требованиями актуальных руководящих документов;
- модернизировать методику моделирования повреждаемости сосудов давления, основанную на методе перекрытия распределений случайных величин, дополнив ее современными представлениями о процессах хрупкого и вязкого разрушения.

2. Разработка и внедрение современного программного средства для оценки вероятности возникновения течи корпуса коллектора ПГ.

Для достижения этой цели потребовалось:

- разработать программный комплекс (ПК) на основании созданной методики моделирования повреждаемости;
- провести анализ влияния неопределенности отдельных блоков программы на результаты расчета вероятности возникновения течи корпуса коллектора ПГ;
- провести верификационные исследования программного средства;
- провести апробацию ПК, путем применения его для практического обоснования надежности элементов РУ.

Научная новизна работы

Заключается в:

- разработке методики моделирования процессов зарождения микроповреждений в стенке корпуса коллектора на основе трех возможных механизмов повреждаемости: разрушения вследствие накопления неупругих

деформаций, коррозионного растрескивания, а также усталостного повреждения материала конструкции при циклическом нагружении в контакте с коррозионной средой;

- разработке методики определения критических размеров трещины при хрупком разрушении, учитывающей возможность различной ориентации трещины (окружную, осевую (вертикальную), косую) по цилиндрической поверхности коллектора, а также перфорацию стенки коллектора, с учетом результатов исследований последних лет в механике разрушения по учету эффектов коротких трещин и двуосного нагружения;
- реализации методики определения критических размеров дефектов при вязком разрушении через локальную и общую пластическую нестабильность;
- разработке программного блока, реализующего метод «теней» при моделировании циклической нагрузки, а также блоки и методики оценки значений коэффициента интенсивности напряжений за пределами диапазона применимости инженерных формул, приведенных в отраслевых нормативных документах;
- создании ПК МАВР-4.1 для расчета вероятности возникновения течи коллекторов ПГ, на основании новых методик и блоков расчета, а также блоков, заимствованных из ПК МАВР-1.1 и МАВР-2.2;
- создании версии МАВР-4.1, реализующей механизм параллельных вычислений на многопроцессорном кластере;
- проведении исследований влияния неопределенности исходных данных на результаты расчета вероятности возникновения течи коллектора, с получением соответствующих зависимостей;
- оценке точности расчетов с помощью программного средства, с учетом погрешностей вычислительных алгоритмов и неопределенности в задаваемых исходных данных;
- проведении верификационных исследований, показывающих соответствие между эксплуатационными данными о выходе из строя коллекторов и глушении

теплообменных трубок ПГ ВВЭР-1000 и расчетными прогнозами, полученными с использованием МАВР-4.1;

- проведении обоснования гипотетического характера события, заключающегося в крупномасштабном разрушении коллектора ПГ ПГВ-100МКП проекта ВВЭР-ТОИ, возникновении некомпенсируемых системой безопасности течей, в соответствии с современными представлениями механики разрушения, требованиями руководящих документов и учетом погрешности вычислений программного средства.

Практическая и теоретическая значимость работы

Результаты данной работы имеют практическую значимость при прогнозировании и обоснованиях надежности и долговечности ПГ. Созданный ПК МАВР-4.1 позволяет оценить вероятность возникновения течи коллектора ПГ на разных этапах его эксплуатации. Эти результаты дают возможность обосновать надежность коллектора ПГ в соответствии с требованием нормативных руководящих документов обеспечить вероятность безотказной работы ЯЭУ не более 10^{-7} на реактор в год. Оценка неопределенности программного средства, полученная в рамках настоящей работы, позволяет проводить данные обоснования с учетом погрешности результатов расчетов, обусловленной неопределенностью исходных данных и погрешностью компьютерных вычислений.

Результаты исследований по влиянию неопределенности исходных данных на вероятность возникновения течи коллектора ПГ могут быть использованы при проектировании или продлении срока службы ЯЭУ в качестве основания для выбора приоритетных направлений в работах по улучшению прочностных или эксплуатационных характеристик ПГ.

Методология и методы исследований

Все исследования, проведенные в рамках данной работы, проводились с использованием ПК МАВР-4.1. В основе МАВР-4.1 лежат законы и

распределения классической теории вероятностей. Поэтому полученные результаты носят вероятностный характер.

Положения, выносимые на защиту

- Методика моделирования повреждаемости коллектора в вероятностной постановке и ее реализация в программном комплексе МАВР-4.1;
- результаты исследования влияния неопределенности исходных данных на результаты расчетов вероятности возникновения течи;
- результаты верификационных исследований;
- результаты применения МАВР-4.1 для обоснования прочности коллектора ПГ в проекте ВВЭР-ТОИ.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Все исследования, представленные в работе, проводились с использованием ПК МАВР-4.1. Для доказательства достоверности полученных результатов расчетов были проведены верификационные исследования. В рамках этих исследований было показано соответствие между расчетными и экспериментальными данными о выходе из строя коллекторов ПГ, а также, о глушении теплообменных трубок ПГ. Подробно результаты исследований представлены в главе 4 работы.

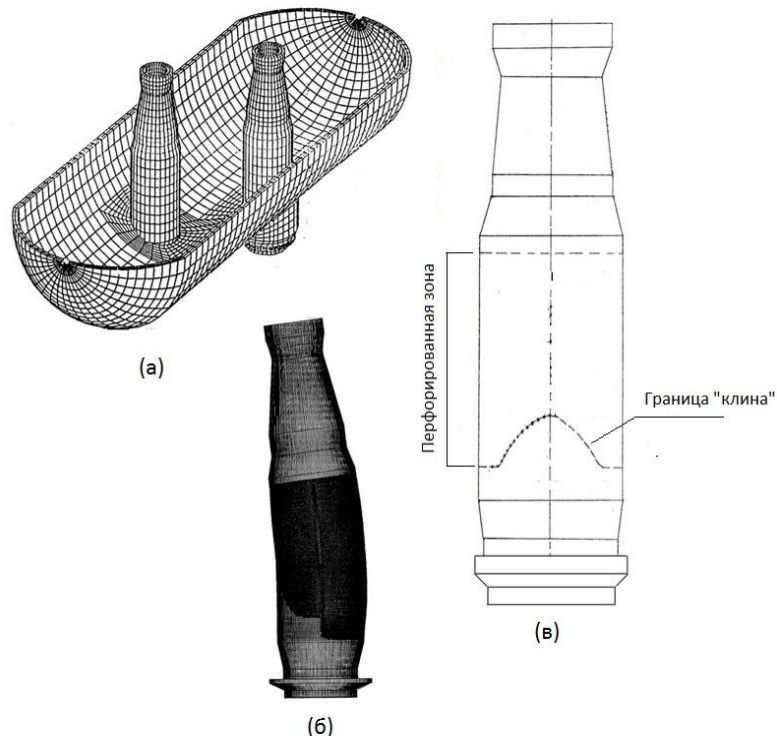
Результаты исследований и разработки отдельных методик докладывались на различных конференциях и семинарах, а именно: на 13-й и 14-й конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам, проведенных ОКБ "Гидропресс" в 2011 и 2012 г.г. в г. Подольске; на 7-м межотраслевом семинаре "Прочность и надежность оборудования" в 2011 г. в г. Звенигороде; на 7-й Российской конференции "Методы и программное обеспечение расчетов на прочность" в 2012 г. в г. Геленджике.

Кроме того, по теме работы было опубликовано 2 статьи в журнале "Атомная энергия", а также выпущен ряд научно-технических отчетов в НИЦ "Курчатовский институт".

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа содержит описание вероятностной методики моделирования накопления повреждений, разработанной для оценки вероятности возникновения течей корпуса коллектора ПГ, а также, описание программного кода МАВР-4.1, созданного на основе данной методики, результаты исследования влияния неопределенности исходных данных на вероятность возникновения течи, верификационные исследования и краткое описание результатов практического применения МАВР-4.1.

Коллектор ПГ типа ПГВ-1000 представляет собой цилиндрический сосуд давления, закрепленный с двух концов в корпусе ПГ. На каждый ПГ приходится по два коллектора: "холодный" и "горячий". Конструктивные особенности коллектора связаны с наличием перфорации под теплообменные трубки, а также "клина" – зоны сопряжения двух цилиндрических поверхностей: корпуса коллектора и корпуса ПГ (рисунок 1).



"а" - сопряжение корпусов коллектора и парогенератора; "б" - коллектор и зона его перфорации; "в" - схема коллектора и "клина".

Рисунок.1. Схема коллектора и "клина".

Проведенные анализы повреждений коллекторов ПГ, выявленных в 1978-1991 годы показали, что развитию трещин способствует, главным образом, статическое и циклическое нагружение конструкции, а также коррозионные процессы, возникающие в зазоре между теплообменной трубкой и корпусом коллектора при недовальцовке трубок. Большинство повреждений было расположено в зоне "клина", что объясняется повышенной концентрацией напряжений в этой зоне. Разработанная методика учитывает результаты данных исследований и эксплуатационно-конструкционные особенности коллектора ПГ.

В основе методики лежит метод перекрытия случайных величин, согласно которому вероятность разрушения (образования течи) – есть интеграл от произведения (пересечения) двух случайных величин: числа дефектов в заданном узком диапазоне размеров (плотности размеров дефектов) и события, при котором критический размер дефекта окажется меньше заданного диапазона:

$$P_{течи,l}(C) = \int_{C_i}^{C_{i+1}} \int_0^h P_x(x, C) F_{xkp}(x, C) dx dC, \quad (1)$$

где $P_x(x, C)$ – плотность вероятности распределения размеров трещины по направлению в глубину (параметр x) стенки коллектора и вдоль стенки (параметр C); $F_{xkp}(x, C)$ – вероятность события, при котором критический размер дефекта в глубину, при заданной длине C , окажется меньше, чем величина x . Под критическим понимается дефект с размерами x и C , при которых происходит неконтролируемый подрост трещины на всю толщину стенки без лавинного роста вдоль стенки.

Методика оценки вероятности возникновения течи корпуса коллектора ПГ состоит из нескольких этапов. На первом осуществляется расчет плотности вероятности распределения размеров дефектов, образовавшихся на стадии изготовления конструкции, и обнаруженных при проведении неразрушающего контроля. Для выполнения следующих этапов весь срок службы ПГ разбивается

на ряд равных временных интервалов, и последующие стадии моделирования выполняются последовательно на каждом отрезке времени. Вторым этапом производится моделирование зарождения новых дефектов в процессе эксплуатации. Возможны следующие механизмы накопления повреждений:

- накопление неупругих деформаций до предельного уровня, определяемого деформационной способностью материала при длительном нагружении,
- термически активированное коррозионное растрескивание,
- коррозионно-усталостное повреждение.

В качестве меры поврежденности материала на каждом временном интервале вводится величина степени повреждения. Условием зарождения трещины является достижение функцией повреждения величины равной 1:

$$\omega_{кр} \geq 1 \quad (2)$$

Функция повреждения $\omega_{кр}$ вычисляется путем нелинейного суммирования функций повреждения от воздействия каждого из трех механизмов зарождения трещины: ω_e , ω_k и ω_c – повреждения за счет неупругих деформаций, термически активированные коррозионные повреждения и коррозионно-усталостные повреждения соответственно:

$$\omega_{кр} = \left(\omega_e^{m_1} + \omega_k^{m_2} + \omega_c^{m_3} \right)^{m_4} \quad (3)$$

Коэффициенты $m_1 \dots m_4$ подбираются при математической обработке экспериментальных данных, в случае их равенства единице формула (3) отражает линейный закон суммирования повреждений.

Критерием повреждения в результате накопления неупругих деформаций служит величина предельного уровня деформаций, корректируемая за счет влияния средней скорости неупругого деформирования и химического состава

коррозионной среды. В общем виде, выражение для степени повреждения записывается как интеграл по времени от отношения суммарной деформации (пластичности и ползучести) к предельно допустимой деформации:

$$\omega_e = \int_0^{\tau} \frac{(\varepsilon_i^p + \varepsilon_i^v)}{\varepsilon_{\text{lim}}} d\tau \quad (4)$$

В основе определения степени повреждения в результате коррозионного растрескивания материала лежит подход, связанный со скоростью диффузионного проникновения химических элементов в глубинные слои материала и, соответственно, временем до разрушения. Степень поврежденности определяется выражением:

$$\omega_k = \int_0^{\tau} \frac{d\tau}{\tau_k(C_{cl}, C_{o2}, \dots)} \quad (5)$$

где τ_k – долговечность перемычки (участка перфорированной зоны коллектора, заключенного между соседними отверстиями), зависящая от химического состава среды и прочих коэффициентов, характеризующих условия нагружения.

Моделирование циклической повреждаемости выполняется в соответствии с Нормами расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Выражение для функции циклической повреждаемости записывается в соответствии с принципом линейного суммирования повреждений:

$$\omega_c = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_{oi}}, \quad (6)$$

где N_i – число циклов i -го типа с одинаковой амплитудой напряжений, асимметрией цикла и температурой; k – общее число различных типов циклов; N_{0i} – число циклов i -го типа, необходимое для разрушения материала.

По описанным критериям выполняется проверка возможности зарождения дефекта в каждой точке сетки и вычисляется вероятность разрушения. Затем определяются плотности вероятности растрескивания материала и плотности вероятности распределения размеров образовавшихся дефектов, с учетом возможности слияния нескольких из них, находящихся в соседних перемычках.

Следующим этапом моделируется докритический подрост дефектов на каждом интервале по времени. В основе лежит уравнение развития трещины под воздействием статических нагрузок (уравнение Париса). Зависимость для расчета скорости роста трещин может быть представлена кусочно-линейной зависимостью, определяемой уравнением:

$$\dot{x} = C_{st} \cdot K_{st}^n, \quad (7)$$

где C_{st} – характеристика материала, K_{st} – коэффициент интенсивности напряжений.

По результатам моделирования осуществляется корректировка вычисленных ранее плотностей распределения размеров дефектов. Также учитывается возможность прорастания трещины на всю толщину стенки коллектора, и, как следствие, образование течи уже на этом этапе.

Заключительным этапом является моделирование критического подрастания дефектов. Условием начала критического подрастания трещины является превышение критериальным параметром соответствующего значения прочностной характеристики материала. Для реализации данной модели фронт трещин представляется в виде полуэллипса и выполняется расчет распределения коэффициента интенсивности напряжений и вязкости разрушения (критического значения) по данному фронту. Если происходит превышение соответствующего

критического значения в одной точке фронта, то трещина начинает подрастать в глубину или в длину. Далее методика предусматривает следующие сценарии развития дефекта: рост несквозной трещины в глубину и длину, остановка несквозной и сквозной трещин (течь без разрыва), образование и стабильный рост сквозной трещины (течь перед разрушением), а также разрыв без предварительного стабильного роста трещины (разрыв без течи). Иначе говоря, хрупкая трещина может остановиться, попав в более вязкую область или за счет перераспределения коэффициента интенсивности напряжений по фронту в процессе роста. Также рассматривается случай крупномасштабного разрушения. Условием его наступления служит нарушение неравенства:

$$\frac{1}{B_p} \int_0^{B_p} \left(\frac{K_I(L) - K_{\min}}{K_{JC}^*(L) - K_{\min}} \right)^4 dL < 1 \quad (8)$$

где: B_p – протяженность фронта расчетного дефекта; $K_I(L)$ – распределение (K_I) по фронту L расчетного (полуэллиптического) дефекта; $K_{JC}^*(L)$ – распределение вязкости разрушения по фронту трещины L ; K_{\min} – константа материала; $K_I = \sqrt{JE/(1-\nu^2)}$, где J – параметр механики разрушения (J -интеграл), определяемый численным методом, при решении упруго-пластической задачи, или с использованием нормативных инженерных формул.

Стоит заметить, что одной из особенностей настоящей методики является учет влияния эффектов коротких трещин и двусосного нагружения на вязкость разрушения, в соответствии с методиками расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-1000 при эксплуатации, а также, учет влияния перфорации и геометрии поверхности на вязкость разрушения. Было показано, что вязкость разрушения не является табличной характеристикой материала. Существует ряд факторов, существенно влияющих на данную величину. Такими факторами являются эффекты коротких трещин и двусосного нагружения, а также наличие перфорации в стенке корпуса коллектора. Учет

первых двух факторов является обязательным при оценке характеристик материала с точки зрения современных нормативных документов. Учет влияния перфорации производится на основании результатов исследований, показавших существенное изменение вязкости разрушения перфорированного материала по отношению к целому образцу. Поправки осуществляются путем введения соответствующих коэффициентов.

Методика предусматривает моделирование по трем механизмам разрушения: хрупкому, хрупко-вязкому и вязкому. Выбор одного из трех механизмов определяет критерий критического подрастания дефектов.

На основании скорректированной на каждом временном интервале плотности распределения размеров дефектов вычисляется вероятность начала критического подрастания для каждой из возможных глубин трещин. Также оценивается вероятность остановки (неостановки) критического подрастания. Совокупность вероятностей старта и неостановки трещины, подросшей на всю толщину стенки коллектора, позволяет вычислить вероятность соответствующей течи или крупномасштабного разрушения.

Оценка условного диаметра течи осуществляется с использованием приближенных аналитических зависимостей для оценки площади раскрытия трещины. В основе этих методик лежат классические уравнения для плоской пластины с трещиной:

$$A = \alpha(\lambda) \gamma(s) A_0, \quad (9)$$

$$A_0 = 2\pi\sigma c^2 / E' \quad (10)$$

где A – площадь раскрытия трещины, A_0 – упругая составляющая площади раскрытия трещины для бесконечной пластины с центральной трещиной длиной $2c$ под действием номинального напряжения σ , коэффициент $\alpha(\lambda)$ – поправка на кривизну оболочки, λ – параметр оболочки, $\gamma(s)$ – поправка на размер пластической зоны, E' равно модулю упругости E при плоско-напряженном

состоянии (тонкостенные сосуды) и $E' = E(1 - \nu^2)$ для плоской деформации, ν – коэффициент Пуассона.

Описанная методика была реализована в виде ПК МАВР-4.1. Расчеты вероятности возникновения течи можно условно разделить на три этапа:

- расчет поля остаточных напряжений, возникающих при запрессовке теплообменных труб, с учетом технологии запрессовки;
- расчет нестационарных полей температуры и напряжений в корпусе коллектора при проектных режимах эксплуатации, включая гидроиспытания, аварийные ситуации, проектное землетрясение и максимальное расчетное землетрясение;
- расчет вероятности разрушения коллектора в процессе эксплуатации путем отдельного вычисления вероятностей возникновения течей разного размера и вероятности крупномасштабного разрушения (разрыва).

Первые два этапа расчетов выполняются с помощью известных конечноэлементных кодов общего назначения (например, ANSYS (в ОКБ "Гидропресс"), UZOR-1 (в НИЦ "Курчатовский институт") и др.). На основании этих вычислений формируются файлы, содержащие поля температуры и напряжений (интенсивности или приведенных, а также компонент тензора напряжений в координатах, привязанных к плоскости трещины), которые являются частью исходных данных для МАВР-4.1.

Следует заметить, что вероятностные вычисления связаны с большим количеством исходных и промежуточных данных, что рождает потребность в существенных вычислительных ресурсах. Для сокращения времени машинных вычислений была создана параллельная версия программы МАВР-4.1. Данная версия адаптирована для работы на многопроцессорных вычислительных кластерах, позволяющих рассчитывать объемные массивы одновременно большим числом процессоров. В настоящее время, параллельная версия МАВР-4.1 установлена на многофункциональном вычислительном комплексе НИЦ "Курчатовский институт". Благодаря существенному снижению времени вычислений, впервые появилась возможность проведения полноценных

исследований влияния большого числа различных факторов на вероятность выхода коллектора из строя, а также оценивать доверительный интервал получаемых расчетных значений вероятности отказа коллектора.

В рамках работы были проведены исследования, направленные на получение сведений о влиянии неопределенности исходных данных на вероятность возникновения течи корпуса коллектора ПГ, а также, оценена суммарная неопределенность программного средства. Исследования преследуют две цели: получение представлений о влиянии наиболее значимых исходных характеристик материалов, конструкционных и эксплуатационных факторов на результат расчета вероятности возникновения течей, и оценка неопределенности результатов расчетов МАВР-4.1, обусловленной погрешностью исходных данных. Работа проводилась на базе данных проекта АЭС-2006 (ВВЭР-ТОИ), для течи с условным диаметром ДУ-43. В качестве примера, в диссертационной работе приведены исследования для 4-х наиболее значительных параметров исходных данных, характеризующих работу отдельных блоков программы: начальная дефектность (стандартное отклонение начальной дефектности); параметр, характеризующий докритический подрост трещин (коэффициент ускорения в уравнении роста трещины в водной среде (уравнении Париса)); критический коэффициент интенсивности напряжений, определяющий, главным образом, критическую фазу развития дефектов (матожидание и стандартное отклонение критического КИН); поле напряжений, влияющее на результаты моделирования на каждом этапе. Также было определено влияние нарушений водно-химического режима (ВХР) на вероятность возникновения течи коллектора. В рамках исследования, в рассматриваемый параметр исходных данных вносилось отклонение его от номинального значения, производился расчет вероятности возникновения течи и сопоставление полученного результата с исходным. В качестве характеристики степени влияния исходных данных на результат был применен коэффициент влияния, показывающий, на сколько процентов изменится результат, в случае отклонения рассматриваемого параметра на один процент. Коэффициент влияния вычисляется из отношения:

$$K_{\text{ВЛ}} = \frac{\Delta_{\text{рез}}}{\Delta_{\text{исх}}} \quad (11)$$

где $\Delta_{\text{исх}}$ – процент изменения исходных данных относительно "номинального" варианта; $\Delta_{\text{рез}}$ – процент изменения результата расчета относительно "номинального" варианта, вычисляемый по формуле:

$$\Delta_{\text{рез}} = \frac{|\Delta P|}{P_{\text{исх}}} \cdot 100\% \quad (12)$$

где ΔP – величина, на которую изменился результат; $P_{\text{исх}}$ – расчетная вероятность для исходного варианта.

Данный коэффициент был рассчитан для каждого параметра исходных данных для трех возможных ориентаций трещин в корпусе коллектора на протяжении проектного срока службы РУ 60 лет. Краткие сведения о результатах приведены в таблице 1. Минимальные и максимальные значения коэффициентов влияния позволяют не только оценить степень влияния той или иной исходной характеристики на вероятность возникновения течи, но и сделать выводы о слабом изменении коэффициентов влияния на протяжении всего периода эксплуатации.

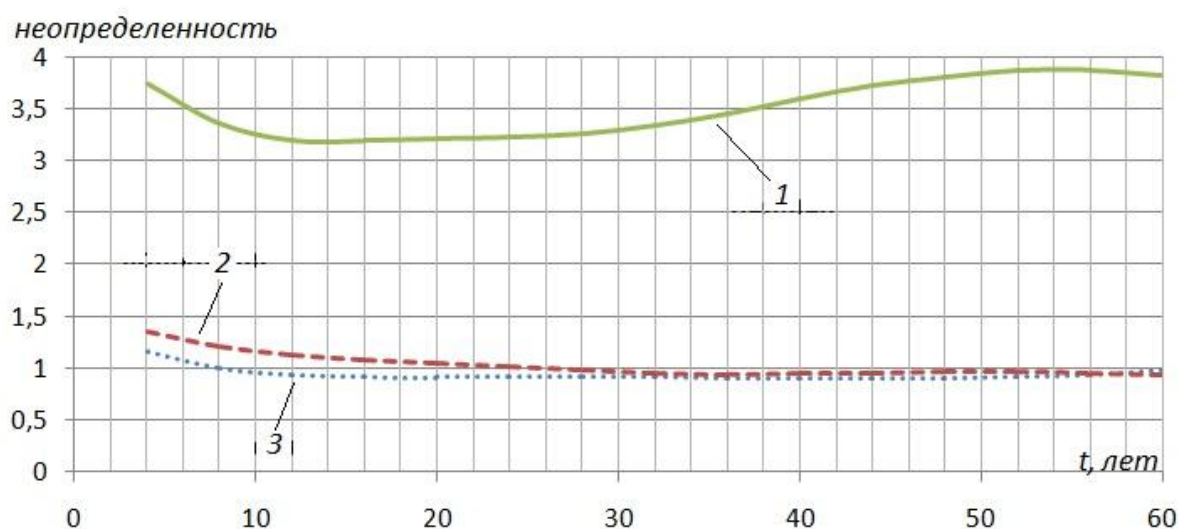
Таблица 1. Диапазон изменения коэффициентов влияния.

Рассматриваемый параметр	Направление трещины	Минимальный коэффициент влияния	Максимальный коэффициент влияния
Стандартное отклонение начальной дефектности	прямая	4,23	4,29
	кольцевая	3	4,2
	косая	2,5	4,2
Коэффициент в уравнении Париса	прямая	1,7	7,1
	кольцевая	0,2	3,6
	косая	0,1	16
Стандартное отклонение критического КИН	прямая	25	70
	кольцевая	0,01	0,64
	косая	0,01	0,17
Матожидание критического КИН	прямая	15,4	17,1
	кольцевая	7,5	11,6
	косая	0,01	1,3
Напряжения	прямая	12	67
	кольцевая	0,1	15,9
	косая	1,6	12,7

Исследование влияния ВХР на вероятность возникновения течи показали, что при эксплуатации с концентрацией хлора в теплоносителе, равной 300 мкг/кг, на протяжении всего проектного срока службы, вероятность возникновения течи может возрасти на 2,5 порядка. Однако такие значения наблюдаются лишь на начальных этапах эксплуатации старых моделей коллекторов, где вальцовка теплообменных трубок проводилась взрывом и верхняя часть коллектора была заневолена в корпусе ПГ. Подобное нарушение ВХР при эксплуатации

современных ПГ значительно менее существенно влияет на надежность коллектора и достигает отклонения в 2-3 раза на поздних этапах эксплуатации.

Также была вычислена общая неопределенность, вносимая всеми рассмотренными исходными данными, и представлена в виде зависимостей $R_k(t)$, позволяющих оценить изменение неопределенности в определении вероятности возникновения течи в зависимости от срока службы РУ, для трех ориентаций дефектов (рисунок 2).



"1"- для вертикальных трещин; "2"- для кольцевых трещин; "3" - для косых трещин.

Рисунок.2. Зависимость от времени неопределенности конечного расчетного значения вероятности возникновения течи для трех ориентаций трещины в стенке коллектора

Максимальная неопределенность расчетов по программному средству МАВР-4.1, за счет неопределенности исходных данных составляет 3,87, а погрешность, обусловленная особенностями машинных вычислений, составляет 0,13 (в долях). Суммарная максимальная погрешность МАВР-4.1 составляет 3,88 (в долях).

Диссертационная работа также содержит верификационные исследования МАВР-4.1. Верификация такого рода программ связана с трудностями,

обусловленными малочисленностью эксплуатационных данных о выходе из строя ПГ и других элементов РУ. По этой причине, в рамках верификации программы, был произведено сопоставление не только с данными о выходе из строя корпусов коллекторов, а также с данными о глушении теплообменных трубок. С этой целью, в МАВР-4.1 задавалась геометрия цилиндрического сосуда давления с вырожденными отверстиями под трубчатку (диаметр отверстия перфорации задавался равным нулю).

Проводилось сравнение расчетной наработки на отказ ПГ, полученной с использованием МАВР-4.1, и эксплуатационных данных о повреждаемости коллекторов первого контура. В качестве эксплуатационных были взяты данные о выходе из строя по причине возникновения течи теплоносителя первого контура ПГ ПГВ-1000 в период 1978 – 1991 г.г. Расчетный промежуток процента отказов на разных стадиях эксплуатации, а также эксплуатационные данные о выходе из строя представлены в таблице 2. В последней графе таблицы 2 приведена доля отказов «холодных» коллекторов от всего числа «холодных» коллекторов, с трубчаткой, завальцованной взрывом и находившихся в эксплуатации в рассматриваемый период.

Таблица 2. Сопоставление расчетных и эксплуатационных данных о выходе коллекторов ПГ из строя.

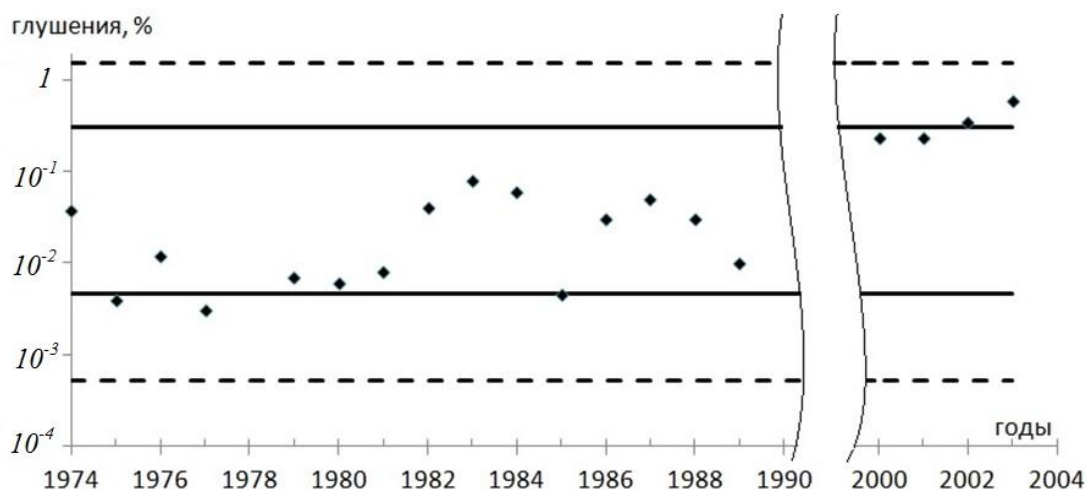
Время работы, лет	Расчетное матожидание отказа на интервале времени, (в %)	Минимальная расчетная доля отказов, (в %)	Максимальная расчетная доля отказов, (в %)	Эксплуатационная доля отказов, (в % от 24 «холодных» коллекторов)	Доля отказов холодных коллекторов (в % от их общего кол-ва)
0-2	12,52	9,29	61,1	41,69	15,63
2-4	9,04	7,45	44,12	33,33	12,50
4-6	6,32	5,19	30,84	8,33	3,12
6-8	5,18	4,16	25,28	16,67	6,25
8-∞	38,32	21,56	100	–	62,5

Из таблицы 2 видно, что эксплуатационные сведения о выходе из строя коллекторов по причине течеобразования попали в расчетный промежуток. Доля отказов от общего числа «холодных» коллекторов, находившихся в эксплуатации в рассматриваемый период, удовлетворительно коррелирует с расчетным матожиданием отказов (второй столбец). Это подтверждает достоверность расчетов по разработанной методике.

Однако следует отметить, что столь высокий процент отказов справедлив лишь для устаревших моделей ПГ, где использовалась взрывная вальцовка трубок, корпус коллектора был заневолен в корпусе ПГ, а также не применялась довальцовка трубок после монтажа. На современных коллекторах вероятность отказа меньше на несколько порядков.

Также было проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных о выходе из строя теплообменных трубок ПГ в различные годы. Теплообменная трубка также является сосудом давления, и такая модель также может быть рассчитана при помощи МАВР-4.1, как частный случай, где диаметр

отверстий перфорации равен нулю. Процент глушения трубок и расчетный «коридор», образованный диапазоном разброса процента отказов (сплошная линия) и погрешностью расчетных значений вероятностей течей, в случае вязкого разрушения, характерного для нержавеющей трубок, (пунктирная линия) представлены на рисунке 3.



Сплошная линия – расчетный диапазон глушения трубок. Пунктирная линия – расширение расчетного диапазона за счет погрешности вычислений. Точками показана эксплуатационная доля глушения в различные годы.

Рисунок. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных о глушении теплообменных труб в различные годы.

Видно, что все значения отказов в различные годы укладываются в расчетный диапазон отказов с учетом погрешности программного средства. Это также подтверждает достоверность результатов моделирования.

В главе 5 диссертации приводятся результаты вероятностного анализа разрушения коллектора ПГ в рамках проектов ВВЭР-ТОИ с исходными данными проекта АЭС-2006, проведенного с использованием ПК МАВР-4.1 Работа проводилась в соответствии с требованием Главного конструктора ВВЭР обосновать, что вероятность реализации аварии, связанной с течью коллектора ПГ из первого контура во второй с условным диаметром более 43 мм (Ду-43), не превышает величину 10^{-6} на реактор в год (либо указать технические и/или

организационные мероприятия, выполнение которых обеспечит выполнение указанного выше требования).

Оценка вероятности возникновения течи проводилась для двух крайних вариантов распределений начальной дефектности по размерам (варианты № 1 и № 7), постулированных Главным конструктором на основании нормативных требований по входному и эксплуатационному неразрушающему контролю дефектов материала.

Расчеты вероятности разрушения при эксплуатации перфорированной зоны коллектора первого контура ПГ ПГВ-1000МКП показали следующие результаты (таблица 3):

Таблица 3. Результаты расчетов вероятности возникновения течи.

	Вариант начальной дефектности	Течь > ДУ-43	Течь > ДУ-100
Макс. вероятность течи коллектора за 60 лет	№1	$4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
	№7	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Макс. среднегодовая вероятность течи на блок РУ	№1	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-6}$
	№7	$8 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
Вероятность крупномасштабного разрушения коллектора за 60 лет	№1	$2 \cdot 10^{-12}$	
	№7	$2 \cdot 10^{-13}$	
Среднегодовая вероятность разрыва коллектора на блок РУ	Для всех постулированных уровней дефектности	$4 \cdot 10^{-13}$	

Таким образом, исследования показали, что вероятность разрушения корпуса коллектора РУ АЭС-2006, включая образование течи более Ду-43, на протяжении

периода эксплуатации 60 лет не превышает 10^{-6} на реактор в год, если начальная дефектность корпуса в районе перфорированной зоны не хуже, чем задаваемая вариантом начальной дефектности № 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработана вероятностная методика моделирования повреждаемости коллектора парогенератора, состоящая из анализа и восстановления начальной дефектности, с учетом эффективности выявления дефектов средствами неразрушающего контроля, моделирования процессов зарождения новых трещин, докритического подроста трещин, а также критического развития дефектов при технологических и эксплуатационных нагрузках. Данная методика отвечает требованиям современных нормативных руководящих документов.
- На основании разработанной методики создан программный комплекс МАВР-4.1, служащий для расчета вероятности возникновения течей корпуса коллектора на разных этапах эксплуатации реакторной установки.
- Проведено исследование и получены сведения о влиянии неопределенности основных исходных данных на вероятность возникновения течи теплоносителя первого контура.
- Оценена общая погрешность программного средства.
- Проведены верификационные исследования программного комплекса МАВР-4.1 и доказана достоверность результатов моделирования повреждаемости.
- Программный комплекс МАВР-4.1 использован при практических расчетах: проанализирована степень надежности корпуса коллектора парогенератора ПГВ-1000МКП и обоснованы условия неразрушающего контроля дефектов материала, при которых для проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ выполняются требования руководящих документов по безопасности эксплуатации (в части непревышения предельно допустимого уровня вероятности возникновения течей и разрывов). Все обоснования проводились с учетом погрешности программного средства и неопределенности исходных данных.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. **Алексеев, П.В.** Расчет вероятности возникновения течи теплоносителя в коллекторе парогенератора ВВЭР по программе МАВР-4.1. /П.В.Алексеев, О.Д. Лоскутов, А.А.Тутнов // Атомная энергия. – 2013. – т.114, вып.1. – с. 17-21.
2. **Алексеев, П.В.** Вероятностный анализ прочности главного разъема реакторной установки ВВЭР-1000. /П.В.Алексеев, А-др.С. Киселев, Ал-й.С. Киселев и др.// Атомная энергия. – 2013. – т.115, вып.3. – с. 147-151.

Материалы конференций:

1. **Алексеев, П.В.** Методические подходы к оценке влияния перфорации на трещиностойкость корпуса коллектора парогенератора. /П.В.Алексеев, О.Д. Лоскутов, А.А.Тутнов // Материалы 13-й конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. – Подольск, 2011.
2. **Алексеев, П.В.** Методические подходы к оценке трещиностойкости корпуса коллектора парогенератора. /П.В.Алексеев, О.Д. Лоскутов, А.А.Тутнов// Материалы 7-го межотраслевого семинара "Прочность и надежность оборудования". – Звенигород, 2011 г.
3. **Алексеев, П.В.** Анализ влияния неопределенности исходных данных на вероятность возникновения течи теплоносителя парогенератора АЭС-2006. /П.В.Алексеев// Материалы 14-й конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. – Подольск, 2012 г.
4. **Лоскутов, О.Д.** Вероятностный анализ коэффициентов запаса, используемых при расчете на прочность. /О.Д.Лоскутов, П.В.Алексеев, А.А.Тутнов// Материалы 7-й Российской конференции "Методы и программное обеспечение расчетов на прочность". – Геленджик, 2012 г.
5. **Алексеев, П.В.** Расчет вероятностей возникновения течей теплоносителя в коллекторе парогенератора ВВЭР (ПК МАВР-4.1). /П.В.Алексеев, О.Д. Лоскутов, А.А.Тутнов// Материалы 7-й Российской конференции "Методы и программное обеспечение расчетов на прочность". – Геленджик, 2012 г.