НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

# ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ: Физика ядерных реакторов

выпуск



**3** Обеспечение безопасности

#### К 70-летнему юбилею ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

В январе 2016 года ОКБ «ГИДРОПРЕСС» отметит 70-летний юбилей. Предприятие было создано в рамках атомного проекта СССР в соответствии с Постановлением СНК СССР №229-100СС/ОП от 28 января 1946 г. Приказом Народного комиссара тяжелого машиностроения Союза ССР от 01 февраля 1946 г. Под руководством Бориса Михайловича Шолковича был сформирован первый коллектив ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Первыми работами конструкторского бюро были проекты теплообменного оборудования для продуктового реактора – наработчика оружейного плутония и проекты исследовательских реакторов для различных институтов, в которых разворачивались работы в новых для страны областях науки и техники. За свою семидесятилетнюю историю ОКБ «ГИДРОПРЕСС» выросло в ведущую конструкторскую организацию страны, осуществляющую комплекс конструкторских, расчетно-теоретических и экспериментальных работ по созданию реакторных установок различных типов для АЭС, с экспериментально-исследовательской и производственной базами. ОКБ «ГИДРОПРЕСС» было создано большое количество проектов различных установок и оборудования. Среди них реакторные установки с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) для АЭС различной мощности, теплообменное оборудование для установок с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, оборудование для установок с реакторами канального типа, ядерные паропроизводящие установки для подводных лодок с использованием в качестве теплоносителя сплава свинец-висмут, кипящего реактора и многие другие. В настоящее время разработка проектов реакторных установок типа ВВЭР широкого диапазона мощности является для предприятия приоритетным направлением работ.

диапазона мощности является для предприятия приоритетным направлением работ. ОКБ «ГИДРОПРЕСС» - автор всех проектов реакторных установок с ВВЭР, по которым всего был сооружен 71 энергоблок в России и за рубежом. На сегодняшний день в эксплуатации 56 энергоблоков с реакторными установками типа ВВЭР на 20 атомных станциях России, Украины, Армении, Финляндии, Болгарии, Венгрии, Чехии, Словакии, Китая, Ирана и Индии. Ведутся работы по сооружению и вводу в эксплуатацию новых энергоблоков с реакторными установками ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 в России и за рубежом. Продолжаются работы по продлению срока службы оборудования реакторных установок первых поколений. За большие заслуги в создании и производстве новой специальной техники ОКБ «ГИДРОПРЕСС» награждено орденом Трудового Красного Знамени и орденом Труда Чехословакии. Многие сотрудники имеют правительственные награды, удостоены званий лауреатов Ленинской и Государственной премий и премии Совета Министров, премии Правительства Российской Федерации, десяткам сотрудников присуждены ученые степени, ряду сотрудников присвоено звание «Заслуженный конструктор России». НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

# ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

**СЕРИЯ:** ФИЗИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Издается с 1989 г.

#### выпуск з

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Издается с 2002 г.

Подольск - 2015

Журнал «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов» издаётся с 1981 года. Выходят пять выпусков в год, которые подготавливают НИЦ «Курчатовский институт» (ответственный за серию «Физика ядерных реакторов» в целом), ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Подписной индекс 32067 в каталоге «Газеты. Журналы» ОАО Агентства «Роспечать».

#### Тематика журнала:

- ядерные реакторы различного типа и назначения, импульсные реакторы, критические сборки;
- теория ядерных реакторов, методы расчёта, вычислительные программы;
- экспериментальные методы, приборы и установки;
- расчётно-теоретические и экспериментальные исследования ядерных реакторов;
- кинетика и динамика ядерных реакторов, контроль и управление;
- ядерная безопасность; радиационная безопасность и защита;
- гидродинамика и теплообмен в ядерных реакторах;
- физико-технические проблемы;
- исследования характеристик реакторных материалов и их изменений под воздействием облучения;
- обеспечение безопасности эксплуатации АЭС и других ядерных установок;
- топливный цикл, отдельные аспекты и общие проблемы ядерной энергетики.

#### Редакционная коллегия:

Главный редактор – Ю.М. Семченков (НИЦ «Курчатовский институт»);

Заместители главного редактора – С.М. Зарицкий, В.В. Пчелин (НИЦ «Курчатовский институт»),

В.Ф. Колесов (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), В.А. Мохов (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»);

Ответственный секретарь – Е.А. Старостина (НИЦ «Курчатовский институт»);

**Члены редколлегии** – П.Н. Алексеев, Е.В. Бурлаков, А.Ю. Гагаринский, А.А. Ковалишин, Н.Е. Кухаркин, М.П. Лизоркин, В.А. Павшук, В.А. Сидоренко, В.С. Устинов, Я.И. Штромбах (НИЦ «Курчатовский институт»); С.В. Воронцов, Е.В. Куличкова, А.С. Кошелев, В.Х. Хоружий («РФЯЦ-ВНИИЭФ»); А.В. Лукин, Ю.А. Соколов («РФЯЦ ВНИИТФ»); Ю.А. Безруков, В.Я. Беркович, И.Н. Васильченко, Д.Н. Ермаков, А.С. Зубченко, С.Р. Сорокин, В.В. Сотсков, Н.Н. Климов, Н.В. Козлачкова, В.М. Махин, В.С. Попадчук, А.В. Селезнев (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»); А.Н. Лупишко (АО «ВНИИАЭС»).

Журнал «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов» включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук (Перечень ВАК).

Журнал «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов» включён в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Статьи из журнала «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов» публикуются в переводе на английский язык в специальных выпусках журнала "Physics of Atomic Nuclei" (перевод Российского журнала «Ядерная физика»), издаваемого PLEIADES PUBLISHING и распространяемого издательством Springer (ISSN: 1063-7788 печатная версия, ISSN: 1562-692X электронная версия).

Журнал "Physics of Atomic Nuclei" индексируется в Academic OneFile, Academic Search, Astrophysics Data System (ADS), Chemical Abstracts Service (CAS), Chemical and Earth Sciences, Current Content/Physical, EBSCO, Environment Index, Gale, Google Scholar, INIS Atomindex, INSPEC, INSPIRE, Journal Citation Reports/ Science Edition, OCLC, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index, Science Citation Index Expanded (SciSearch), Summon by Serial Solutions.

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. При перепечатке и цитировании ссылка на журнал обязательна. Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции.

ISSN 0205-4671

УДК 621.039

© АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2015
 © НИЦ «Курчатовский институт», 2015
 © ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015

#### ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТОРА

#### А.Н. Козлачков; М.А. Быков, к.т.н.; В.Н. Сиряпин, к.т.н.

(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

Исследована надежность системы аварийной защиты реактора с учетом отказов различного количества органов регулирования системы управления и защиты (OP CV3). Существует большое количество комбинаций отказов OP CV3. Выполнить расчетное обоснование даже для малой части всех возможных комбинаций не представляется возможным. Разработана методика, основанная на применении искусственных нейронных сетей, которая позволяет оценить вероятность нарушения критериев безопасности для различных комбинаций отказов.

**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть, анализ неопределённостей, ВВЭР, реактор, надежность, аварийная защита, разрыв паропровода

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR SCRAM RELIABILITY ANALYSES / A.N. KOZLACHKOV, M.A. BYKOV, V.N. SIRYAPIN // The reactor scram reliability in case of multiple control rods failures has been studied. There is a great number of combinations of control rod failures. It is impossible to perform thermo-hydraulic calculational verification even for a small part of these possible combinations. The procedure using artificial neural networks, which can estimate probability of safety criteria violations for different combinations of failures, has been developed.

**Key Words**: artificial neural network, uncertainty analysis, VVER, reactor, reliability, scram system, steam line rupture.

#### Введение

В статьях [1] и [2] рассмотрен вопрос надежности системы аварийной защиты реактора при отказах различного количества ОР СУЗ. Анализ надежности состоит в оценке соответствия функциональных показателей надежности СУЗ (в части АЗ) показателям, заданным в ГОСТ 26843-86 [3] (вероятность невыполнения функции аварийного останова реактора не должна превышать значения 10<sup>-5</sup> 1/требование).

Общая надежность системы аварийной защиты зависит от двух факторов:

вероятности отказа различного количества ОР СУЗ;

 условной вероятности нарушения приемочных критериев безопасности при таких отказах.

Под отказом аварийной защиты понимается нарушение какого-либо критерия безопасности в случае, когда необходимо срабатывание этой системы. Общую вероятность невыполнения функции аварийного останова реактора можно определить как произведение двух векторов:

$$Q_{\rm RPS} = q^{\rm T} q_{\rm c} , \qquad (1)$$

где  $q^{T}$  – транспонированный вектор вероятностей отказа 0, 1, 2...61 ОР СУЗ;

 $q_{\rm c}$  – вектор условных вероятностей нарушения критериев безопасности во время аварии при отказе 0, 1, 2...61 ОР СУЗ.

Предлагается методика, которая позволяет определять второй компонент, а именно условную вероятность нарушения приемочных критериев безопасности при отказе различного количества ОР СУЗ. Исследуется состояние реакторной установки во время аварии с исходным событием «Разрыв паропровода» при множественных отказах ОР СУЗ.

Существует большое количество комбинаций отказов ОР СУЗ. Например, для отказа одного ОР СУЗ возможна 61 комбинация, для двух – (61.60)/2 = 1830 комбинаций, для трех – (61·60·59)/6 = 35990 комбинаций и так далее. Выполнить теплогидравлический расчет для каждого случая не представляется возможным. Как же оценить вероятность нарушения критериев безопасности для различных комбинаций отказов?

Для решения этой проблемы предлагается применение различных методов статистической обработки данных. Алгоритм состоит из нескольких этапов:

 выполнение серии теплогидравлических расчетов, для которых отказы различных ОР СУЗ задаются случайным образом, общее количество отказов также варьируется;

 выполнение статистической обработки данных, которая позволяет выявить некоторые закономерности и получение математических моделей, которые позволили бы оценить критериальные параметры безопасности, получаемые в ходе переходного процесса на основании данных об отказах;

использование полученных математических моделей в процедуре Монте-Карло для оценки вероятности нарушения критериев безопасности при различном количестве отказов в конкретном рассматриваемом сценарии аварии.

При реализации данной методики в статьях [1] и [2] в качестве математической модели используется поверхность отклика. В настоящей статье демонстрируется применение искусственной нейронной сети.

#### Развитие искусственных нейронных сетей

Развитие искусственных нейронных сетей тесно связано с изучением нервной системы различных биологических организмов [4]. Ведь искусственная нейронная сеть – ни что иное, как попытка смоделировать те процессы, которые происходят в нервной системе животных и человека. Нервная система и мозг состоят из нейронов – биологических клеток, способных обрабатывать информацию. Нейроны соединены между собой нервными волокнами, которые передают электрические импульсы. Каждый нейрон посредством этих волокон получает сигналы от других нейронов, обрабатывает их, и, в свою очередь, передает сигналы в другие клетки.

Первые искусственные нейронные сети создавались в виде специализированных

электронных машин, которые назывались персептронами. Позже все большее применение стали получать программы, которые имитируют работу нейронов на компьютере.

Одним из важнейших свойств искусственных нейронных сетей является способность к обучению на основании имеющейся информации, а после завершения процесса обучения – возможность прогнозирования.

Алгоритм проектирования искусственной нейронной сети заключается в следующем: сформулировать цели, определить входные и выходные параметры и структуру сети, организовать процесс обучения, т. е. продемонстрировать сети верные решения. Во время обучения нейронная сеть устанавливает закономерности между входными и выходными параметрами.

Популярность искусственных нейронных сетей лавинообразно росла, что можно объяснить действительно хорошими результатами. Неоспоримые плюсы нейронных сетей следующие:

 применимость к решению задач высокой сложности;

 необязательно знать точные правила, описывающие исследуемые процессы.

Далее для краткости будем называть искусственные нейронные сети просто нейронными сетями. Нейронные сети применяются в различных областях [5]:

1. В медицине. Например, в госпитале Anderson Memorial Hospital (штат Южная Каролина, США) нейронная сеть используется для оптимизации процесса лечения. Как следует из публикации, сэкономлены миллионы долларов и спасены жизни нескольких десятков человек.

2. В экономике (прогноз курсов валют, формирование решения о выдаче кредита конкретному человеку или организации и т. д.).

3. В распознавании образов.

Также нейронные сети нашли весьма широкое применение и в технике. Ниже приводятся лишь некоторые примеры их использования:

1. Американское агентство по исследованию космического пространства NASA использует нейронные сети для управления рукой робота, задача которого – захват произвольно расположенных предметов.

2. Фирма General Dynamics разработала систему классификации и распознавания сигналов сонара, основанную на нейронных

сетях. Система позволяет точно распознавать типы гражданских и военных судов, более того, идентифицировать названия кораблей.

3. Фирма General Devices Space Systems использует нейронные сети для управления работой 150 клапанов, подающих топливо и окислитель в двигатели ракеты «Атлас».

4. Фирма Eaton Corporation использует нейронную сеть в системе управления, помогающей водителю большого грузового автомобиля (5 осей, 18 колес) выполнять сложные маневры, например, движение задним ходом с прицепом.

5. Концерн Ford Motor Company использует нейронные сети в системе диагностирования двигателей.

Список можно продолжить.

Существует опыт применения искусственных нейронных сетей и для расчетного обоснования реакторных установок. Например, в статье [6] описывается возможность создания кодов реального времени, моделирующих переходные процессы на основе искусственных нейронных сетей. Обучение ведется при помощи расчетных данных, полученных по коду Athlet. Искусственная нейронная сеть демонстрирует хорошую сходимость с эталонными результатами, но при этом скорость расчета значительно выше.

#### Устройство искусственного нейрона и нейронных сетей

Составным элементом любой нейронной сети является нейрон. Нейрон состоит из трех компонентов, каждый из которых выполняет свою функцию: умножителей входных сигналов (синапсов), сумматора и нелинейного преобразователя (рис. 1). Синапсы умножают входной сигнал на число w – вес синапса, который характеризует силу связи. Сумматор выполняет сложение этих умноженных входных сигналов, а также свободного члена (b). Нелинейный преобразователь реализует некоторую функцию (линейную или нелинейную), аргументом которой является выход сумматора. Эта функция называется функцией активации. Результат этой функции – выходной сигнал нейрона.

Могут применяться различные типы функций активации нейрона [4], некоторые из них приведены в таблице 1.



Рис.1. Строение искусственного нейрона

Таблица 1

№	Название	Формула
1	Линейная	$y = k \cdot x$
2	Полулинейная	$y = \begin{cases} k \cdot x, x > 0\\ 0, x \le 0 \end{cases}$
3	Логистическая	$y = \frac{1}{1 + e^{-\mathbf{a} \cdot \mathbf{x}}}$
4	Линейная с насыщением	$y = \begin{cases} -1, x \le -1 \\ x, -1 < x < 1 \\ 1, x \ge 1 \end{cases}$
5	Пороговая	$y = \begin{cases} 0, x < 0\\ 1, x \ge 0 \end{cases}$
6	Квадратичная	$y = x^2$

Функции активации нейрона

Одной из наиболее распространенных является нелинейная функция с насыщением – так называемая логистическая функция ( $N \ge 3$  в таблице 1). График такой функции (с коэффициентом a = 2) представлен на рисунке 2.

В искусственной нейронной сети множество нейронов объединены в единую сеть. При этом выходные сигналы одних нейронов поступают на вход в другие.

#### Оценка консервативности предлагаемой методики

Рассмотрим, каким образом можно оценить точность математических моделей, используемых в методике.



Рис.2. Логистическая функция активации

Как уже отмечалось выше, в [1] и [2] подробно рассмотрено построение поверхности отклика, используемой в качестве математической модели. На основе имеющегося набора теплогидравлических расчетов строится линейная аппроксимация зависимости критерия безопасности от входных переменных. В данном случае определяется значение минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена в зависимости от сочетаний отказов ОР СУЗ:

$$K(x_1, x_2...x_{61}) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + ... + a_{61} x_{61},$$
(2)

Здесь  $a_0, a_1, a_2... a_{61}$  – коэффициенты линейной функции, которые находятся таким образом, чтобы полученное значение  $K(x_1, x_2, x_3...x_{61})$  наилучшим образом соответствовало результату теплогидравлических расчетов. Оценивается минимальное значение коэффициента запаса до кризиса теплообмена в ходе переходного процесса на том этапе аварии, где существует опасность возникновения повторной критичности. Входные параметры  $x_1, x_2, x_3...x_{61}$  – данные о наличии или отсутствии отказа конкретного ОР СУЗ, которые могут принимать значение 0 (в случае срабатывания данного ОР СУЗ) и 1 (в случае отказа).

Для того, чтобы оценить, на сколько хорошо полученная поверхность отклика описывает исследуемое событие, построен



*Рис 3.* Сопоставление значений минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена по поверхности отклика и по теплогидравлическому расчету

график, представленный на рисунке 3. Здесь для каждого рассматриваемого случая по оси абсцисс отложено значение минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена, полученное по поверхности отклика, а по оси ординат – это же значение, но полученное в результате теплогидравлического расчета.

Для оценки расхождений ряда опытов в статистике широко применяется стандартное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (K - \overline{K})^2}{N - 1}}$$
(3)

где *N* – количество телогидравлических вычислений;

 К – величина минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена, полученная по поверхности отклика;

K- истинное значение минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена, полученное в результате теплогидравлического расчета (очевидно, что теплогидравлический код имеет свою погрешность, но при построении математических моделей, основанных на проведенных расчетах, это значение считаем истинным или эталонным).

Стандартное отклонение составляет  $\sigma = 0,288.$ 

Для нас наиболее важной является та область, где коэффициент запаса близок



Рис 4. Зоны с консервативными и неконсервативными значениями минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена, полученными по поверхности отклика

к единице, т. е. там, где существует опасность нарушения критерия безопасности (на рисунке 3 отмечена овалом). Поэтому отдельно оценим стандартное отклонение для тех вариантов, где K < 2:  $\sigma_{K < 2} = 0,270$ .

Следует отметить, что в наиболее критичной области поверхность отклика дает результаты более консервативные, чем истинные.

На рисунке 4 вся область возможных значений разбита на две части. В первой из них значения, полученные по поверхности отклика, меньше, чем по теплогидравлическому расчету. Таким образом, подобласть 1 – это консервативная часть, подобласть 2 – неконсервативная. Если точка лежит на линии, значит, в данном случае поверхность отклика дает идеальное решение (т. е. совпадает с результатом теплогидравлического расчета).

С другой стороны, мы используем поверхность отклика в процедуре Монте-Карло для того чтобы оценить, нарушены



*Рис 5.* Зоны с правильным и неправильным определением кризиса теплообмена

ли при данной комбинации отказов критерии безопасности или нет. Поэтому область можно разделить так, как представлено на рисунке 5. Характеристики этих зон представлены в таблице 2.

В зонах 2 и 3 наличие или отсутствие кризиса теплообмена определено правильно (совпадает, как по теплогидравлическому расчету, так и по поверхности отклика). В зоне 1 по поверхности отклика получается кризис теплообмена, хотя согласно результатам теплогидравлических расчетов кризиса нет. То есть в этой зоне поверхность отклика допускает ошибку. Также ошибка имеет место и в зоне 4. Здесь согласно поверхности отклика кризис теплообмена отсутствует, хотя в теплогидравлических расчетах кризис есть. При этом в зоне 4 ошибка поверхности отклика неконсервативная. Т. е. попадание точек в эту область самое непредпочтительное.

В таблице 2 представлено количество случаев, относящихся к различным зонам. Имеем 77 случаев в 1 зоне, 1298 – во второй,

Таблица 2

Зоны сопоставления результатов по поверхности отклика с результатами теплогидравлических расчетов

	Наличие/отсутстви	Количество случаев в	
Номер зоны	Поверхность отклика	Теплогидравлический расчет	данной зоне
1	+	_	77
2	_	_	1298
3	+	+	91
4	_	+	10

91 — в третьей и 10 — в четвертой. Т.е. доля консервативных ошибок составляет 5.22 %, а доля нежелательных неконсервативных — всего 0.68 %.

Также по этим данным можно оценить долю случаев, полученную по теплогидравлическим расчетам и по поверхности отклика, в которых имеет место кризис теплообмена.

$$Q_{TT} = \frac{N_3 + N_4}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4} = \frac{91 + 10}{77 + 1298 + 91 + 10} = 0.068$$
(4)

$$Q_{no} = \frac{N_1 + N_3}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4} =$$
  
=  $\frac{77 + 91}{77 + 1298 + 91 + 10} = 0.114$  (5)

где  $Q_{TT}$  – доля кризисов теплообмена, полученная по результатам теплогидравлических расчетов;

*Q<sub>по</sub>*- доля кризисов теплообмена, полученная при помощи оценки по поверхности отклика;

 $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_4$  – количество случаев, относящихся соответственно к зонам 1, 2, 3 и 4 в соответствии с рисунком 5.

Таким способом можно оценить консервативность предлагаемой методики использования линейной функции в качестве поверхности отклика.

#### Частный случай нейронной сети

Частный и простейший случай нейронной сети – это сеть, состоящая всего лишь из одного нейрона. Если при этом используется линейная функция активации ( $\mathbb{N}$  1 из таблицы 1) с коэффициентом *k*, равным 1, минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена будет определяться линейной функцией (2).

Ранее для нахождения линейной функции, которая бы наилучшим образом описывала изучаемое явление, использовался метод наименьших квадратов. Если представить входные и выходные параметры в матричном виде, то получим матрицу исходных входных параметров X и вектор результатов K:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_1^1 & \dots & x_{61}^1 \\ 1 & x_1^2 & \dots & x_{61}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_1^N & \dots & x_{61}^N \end{pmatrix}, \quad K = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \dots \\ K_{61} \end{pmatrix}$$

где *N* – количество рассматриваемых случаев.

Тогда коэффициенты  $a_0, a_1, a_2 \dots a_{61}$  из формулы (2) находятся следующим образом:

$$A = \left(X^T X\right)^{-1} X^T K \tag{6}$$

В данной работе для нахождения коэффициентов линейной функции использованы методы, применяемые при обучении нейронных сетей. Алгоритм обучения следующий:

1) Изначально все коэффициенты определяются случайным образом, либо приравниваются какому-нибудь значению.

2) Далее для каждого отдельного случая находится значение минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена. При этом используется линейная функция:

 $K(x_1, x_2...x_{61}) = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + ... + a_{61} \cdot x_{61}.$ 

3) Данное значение сравнивается со значением, полученным в ходе теплогидравлического расчета (можно назвать его эталонным значением). Оценивается разница между ними.

4) Для тех ОР СУЗ, которые в рассматриваемом случае отказывают (т. е. если  $x_i = 1$ ), коэффициенты изменяются в соответствии с формулой:

$$a_{i} = a_{i}' + (\overline{K} - K) \cdot \mu$$
<sup>(7)</sup>

где *К* – минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена, найденный при помощи лин<u>ей</u>ной функции;

K — минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена, полученный в результате теплогидравлического расчета (т. е. эталонное значение);

*а*<sub>і</sub> – коэффициент для і-го ОР СУЗ;

*а*<sub>i</sub>'- начальный коэффициент;

 $\mu$  – коэффициент, определяющий скорость обучения - насколько быстро мы будем приближаться к идеальному значению на каждой итерации (0 <  $\mu$  < 1).



Рис 6. Процесс корректировки весовых коэффициентов

Таким образом, в ходе обучения данной упрощенной нейронной сети, состоящей из одного нейрона, на каждом шаге происходит корректировка весов связей. Значения минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена, получаемые при помощи нейронной сети, постепенно приближаются к эталонным значениям.

На рисунке 6 графически представлен процесс корректировки весовых коэффициентов для нескольких ОР СУЗ (№ 2, 18 и 49). Изначально коэффициенты с  $a_1$  по  $a_{61}$  принимаются равными 0, а коэффициент  $a_0$  равным 1. В процессе реализации представленного выше алгоритма они изменяются. Для обучения использовалось 1476 случаев - так называемая обучающая выборка. В теории искусственных нейронных сетей существует такое понятие как эпоха обучения – алгоритм «проходит» всю обучающую выборку один раз. На рисунке показан результат обучения для 32 эпох. Рассматриваемые коэффициенты, относящиеся к ОР СУЗ № 2, 18 и 49, соответственно становятся равными 0.007, -0.001 и -0.227. Если продолжить обучение, коэффициенты продолжат корректироваться, однако скорость корректировки будет постепенно замедляться вплоть до 0.

Результаты, полученные таким способом, близки к тем, которые были получены при помощи метода наименьших квадратов.

Рассмотрим, что получится, если коэффициент скорости обучения варьировать в зависимости от значения минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена. Наиболее важно получать точные результаты в области малых значений минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена. Поэтому в области, где K < 2, используем больший коэффициент скорости обучения, чем в области, где  $K \ge 2$ .

Таким способом можно добиться большей точности в области малых значений минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена, как видно из рисунка 7 (хотя для всей области значений в целом точность хуже).

Как уже отмечалось выше, для оценки точности используется стандартное отклонение. Для всей области значений оно составляет



*Рис 7.* Влияние коэффициента скорости обучения на результаты расчета

 $\sigma = 0,418$ , а для области с  $K < 2 - \sigma_{K < 2} = 0,157$  (ранее с одинаковым коэффициентом скорости обучения были получены следующие значения стандартных отклонений:  $\sigma = 0,288$  и  $\sigma_{K < 2} = 0,270$ ).

Таким образом, несмотря на увеличение ошибки для всей области значений, для важной нам области значений (*K*<2) ошибка уменьшена.

#### Нейронные сети с несколькими слоями

По-настоящему мощный математический аппарат можно получить, если объединить искусственные нейроны в сеть. При этом выходной сигнал одних нейронов является входным сигналом для следующих, как показано на рисунке 8. Рассмотрим, как работает такая нейронная сеть. Входные сигналы подаются на нейроны входного слоя, обозначенные треугольниками (в отличие от нейронов других слоев). Они играют роль распределителей, т. е. не выполняют каких-либо преобразований, а лишь рассылают сигналы по всем нейронам следующего слоя. Сигналы преобразуются в зависимости от веса каждой связи, затем они суммируются и обрабатываются некоторой функцией активации. Получившиеся в результате обработки выходные сигналы передаются далее на входы нейронам следующего слоя.

В данной работе использовалась сеть со следующей топологией. Во входном слое имеется 61 нейрон – соответствует количеству ОР СУЗ. На каждый нейрон поступают данные о срабатывании или отказе соответствующего ОР СУЗ (0 – в случае срабатывания,



*Рис.8.* Структура нейронной сети с одним скрытым слоем

1 – в случае отказа). Входные сигналы после умножения на соответствующие весовые коэффициенты связей перераспределяются на нейроны второго (скрытого) слоя. В нейронах этого слоя используется функция активация № 3 из таблицы 1 с коэффициентом a=2.

Количество нейронов скрытого слоя равно 32. Такое количество нейронов в скрытом слое выбрано в соответствии с рекомендацией [4], что количество нейронов в скрытом слое должно быть примерно вдвое меньше, чем во входном слое. Очевидно, что маленькая нейронная сеть может оказаться слишком примитивной для решения поставленной задачи, а слишком большая сеть создаст проблемы в процессе обучения. Следует сделать пояснение. Несмотря на уже многолетнюю историю развития искусственных нейронных сетей, не существует точной теории, какое количество слоев и какое количество нейронов в каждом слое выбрать. Но тем не менее, существуют некоторые рекомендации, найденные методом проб и ошибок.

Выходные сигналы из скрытого слоя поступают на вход в единственный нейрон третьего слоя. Так как на выходе в нашем случае нужно получить значение коэффициента запаса до кризиса теплообмена при конкретной комбинации отказов, в третьем слое всего один нейрон. В качестве функции активации используется линейная функция (№ 1 в таблице 1). Опять же, данная функция выбрана, исходя из конкретной цели задачи – найти действительное число, поэтому линейная функция подходит наилучшим образом.

При обучении сети происходит коррекция коэффициентов входных сигналов. Можно сказать, что основной объем информации об обучении содержится в этих коэффициентах для скрытого слоя. При рассматриваемой топологии имеем 1952 коэффициента. Очевидно, что такая нейронная сеть обладает гораздо большим «интеллектом», чем рассматриваемая выше линейная функция, в которой используется всего 61 весовой коэффициент.

#### Алгоритм обучения

Существуют различные алгоритмы обучения нейронных сетей. В данной работе применяется один из самых популярных, который оперирует с таким понятием как «поверхность ошибки». Об успехах обучения свидетельствует снижение погрешности.

В качестве параметра, определяющего ошибку для всей сети в целом, используем стандартное отклонение (формула 3). Таким образом, решается задача оптимизации, т. е. поиска минимума ошибки. Очевидно, стандартное отклонение зависит от весовых коэффициентов связей. А сам процесс обучения нейронной сети следует организовать так, чтобы весовые коэффициенты постепенно корректировались, чтобы значение стандартного отклонения уменьшалось. Т.е. ведется поиск минимума функции  $\sigma = \sigma (w_{11}, w_{12}, \dots, w_{32.61})$ .

Здесь и далее первый коэффициент означает номер нейрона второго (скрытого) слоя, второй коэффициент – номер нейрона первого слоя, от которого поступает входной сигнал (соответствует номеру ОР СУЗ).

Поясним, каким образом это делается. Алгоритм состоит из нескольких этапов:

1) Изначально все весовые коэффициенты связей, а также свободные члены для каждого нейрона выбираются случайным образом.

2) Находится частная производная для каждого из 1952 коэффициентов, т.е.

$$\frac{\frac{\partial \sigma(w_{1,1}, w_{1,2}, w_{1,3}, \dots, w_{32,61})}{\partial w_{1,1}},}{\frac{\partial \sigma(w_{1,1}, w_{1,2}, w_{1,3}, \dots, w_{32,61})}{\partial w_{1,2}}}$$
и т. д.

3) Корректируются те весовые коэффициенты, производная которых наибольшая по модулю (реализуется идея известного численного метода нахождения экстремума функции – алгоритма наискорейшего спуска). При этом, чем больше (по модулю) погрешность, тем большим изменениям подвергается коэффициент. Также при корректировке весовых коэффициентов реализуется механизм, называемый методом момента [5], который позволяет сделать процесс обучения более стабильным. При этом повышается инерционность обучения. Суть его заключается в том, что изменения весовых коэффициентов зависят как от погрешности, допущенной сетью во время текущей итерации, так и от погрешностей на предшествующих итерациях.

Об успехах обучения можно судить по уменьшению погрешности. При этом сначала процесс развивается быстро, потом постепенно замедляется и, наконец, прекращается совсем. При получении удовлетворительной точности обучение прекращается. В противном случае алгоритм повторяется с пункта 2.

Таким образом, реализуется простой, но эффективный механизм. Сеть раз за разом улучшает свою функциональность до тех пор, пока не получится приемлемая точность.

Алгоритм обучения реализован на языке программирования РНР. Хранение текущих значений весовых коэффициентов, а также изменений на предыдущих итерациях организовано при помощи таблиц базы данных MySQL.

#### Результаты

Рассмотрим, каким образом количество и расположение отказавших ОР СУЗ влияет на результаты расчета. Минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена зависит от следующих факторов:

 расположения отказавших ОР СУЗ относительно фронта холодного теплоносителя;

– расположения отказавших ОР СУЗ относительно наиболее теплонапряженных ТВС;

 взаимного влияния расположенных поблизости отказавших ОР СУЗ.

Линейная поверхность отклика способна смоделировать первые два фактора, но не третий. Именно этим можно объяснить нелинейную зависимость между входными и выходными параметрами (рисунок 3). Нейронная сеть учитывает все три фактора, в чем ее несомненное преимущество.

Рисунок 9 аналогичен рисунку 3. Для каждого случая по оси абсцисс отложено минимальное значение запаса до кризиса теплообмена, полученное при помощи нейронной сети, а по оси ординат – это же значение, но полученное в результате теплогидравлического расчета. Также на рисунке показан интервал, равный 2 σ.

Сопоставив рисунки 3 и 9, можно сравнить результаты, получаемые при помощи линейной поверхности отклика и искусственной нейронной сети. Видно, что искусственная нейронная сеть дает более точные результаты. К тому же она способна смоделировать нелинейные взаимосвязи между входными и выходными параметрами. Стандартное отклонение для всей области значений  $\sigma = 0,099$ , а для области с K < 2 составляет  $\sigma_{K < 2} = 0,089$  (для сравнения, по линейной поверхности отклика



*Рис.9.* Сопоставление значений минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена по нейронной сети и по теплогидравлическому расчету



*Рис.10*. Способность нейронной сети предсказывать результат

значения стандартных отклонений:  $\sigma = 0,288$  и  $\sigma_{K<2} = 0,270$ ).

Наиболее полезным и практически применимым свойством нейронной сети является способность предсказывать результаты. Для его демонстрации выполним следующее. Сначала запускается алгоритм обучения, т. е. значения весовых коэффициентов связи корректируются при помощи некоторой обучающей выборки. На основе имеющихся данных

искусственная нейронная сеть выявляет и запоминает некоторые закономерности исследуемого явления. Затем уже обученную сеть можно применять для того, чтобы находить решения для новых случаев, не имея эталонных значений для сравнения. Для проверки способности прогнозирования результаты, получаемые при помощи нейронной сети, сравнивались с некоторым набором расчетных данных. Эти данные не участвовали в обучении нейронной сети, а использовались лишь для контроля ее способности предугадывать

#### Таблица 3

<b>N</b> C-	IN						OUT			
JAG	1	2	3	4	5	6	7	61		
1	0	0	1	0	1	1	0	1	1.564	
2	0	1	1	0	1	0	0	0	0.895	ВІ
3	1	0	0	0	1	1	0	0	2.378	ени й се
4	1	0	0	1	0	1	0	1	1.189	буч
5	0	1	0	0	1	0	1	0	0.987	0 RI Iodi
										дл неј
k	1	1	0	0	0	0	1	0	2.193	
k + 1	1	0	0	0	1	0	1	1	3.176	н
k + 2	1	1	1	0	0	1	0	1	0.976	epk
										Д DOB
N	0	1	0	0	1	1	0	0	1.876	Ē

Структура входных и выходных параметров для обучений нейронной сети и проверки ее способности предсказывать результат

результаты. Таким образом, весь набор имеющихся расчетов был разделен на две части. В таблице 3 представлена структура данных, используемых для обучения нейронной сети, а также для ее контроля. Входные параметры (обозначено IN) – это данные по факту отказ/ срабатывание каждого ОР СУЗ в конкретном опыте. Выходные данные (OUT) – минимальные значения коэффициентов запаса до кризиса теплообмена.

Полученные результаты представлены на рисунке 10. Те случаи, которые участвовали в обучении нейронной сети, показаны бледным цветом, а те, которые использовались для проверки – ярким.

Видно, что точность для тех случаев, которые не участвовали в обучении нейронной сети, хуже, но вполне приемлема -  $\sigma = 0,167$ . На рисунке 10 показан интервал  $\pm 2 \sigma$  для тех вариантов, которые участвовали в обучении, и для тех, которые использовались для проверки.

Чтобы гарантировать консервативность получаемых результатов, можно сместить все результаты, получаемые при помощи нейронной сети, на величину 2  $\sigma$  (как показано на рисунке 10).

#### Заключение

В данной статье продемонстрировано применение искусственной нейронной сети для определения надежности аварийной защиты реактора в аварии с разрывом паропровода. В процессе обучения нейронная сеть определяет взаимосвязи между входными и выходными параметрами для некоторого сценария аварии на основании набора расчетных данных. Предлагается методика, которая заключается в построении искусственной нейронной сети и применении ее в процедуре Монте-Карло для определения условной вероятности нарушения приемочных критериев безопасности.

Использование в процедуре Монте-Карло теплогидравлических расчетов не представляется возможным ввиду того, что необходимо рассмотреть большое количество случаев для различного количества отказов и выполнить теплогидравлический расчет для каждого из них невозможно. Искусственная нейронная сеть после обучения позволяет быстро оценивать критериальные параметры безопасности, достигаемые в рассматриваемом переходном процессе.

Для обучения и проверки искусственной нейронной сети использованы данные для отказов разного количества ОР СУЗ. Следовательно, прогноз, который применяется в процедуре Монте-Карло, пригоден для определения вероятности кризиса теплообмена при различном количестве отказов ОР СУЗ.

Искусственная нейронная сеть обладает некоторыми преимуществами по сравнению с применяемой ранее линейной поверхностью отклика. Она моделирует некоторые нелинейные закономерности между входными и выходными параметрами, на что не способна линейная поверхность отклика. Например, взаимное влияние отказавших ОР СУЗ, которые расположены рядом. В виду того, что в процессе обучения корректируется гораздо большее количество коэффициентов, искусственная нейронная сеть обладает большими способностями к обучению.

Имеются и некоторые недостатки. Вопервых, для обучения искусственной нейронной сети требуется большее количество теплогидравлических расчетов, чем для построения поверхности отклика. Во-вторых, сам процесс обучения с корректировкой большого количества весовых коэффициентов связей сложен и требует большого количества математических операций. Но, ввиду того, что вычислительная техника развивается быстрыми темпами, можно с уверенностью сказать, что искусственные нейронные сети перспективный математический аппарат, который можно использовать для выполнения конкретных инженерных задач.

#### Список литературы

1. Козлачков А.Н., Быков М.А., Сиряпин В.Н. Применение поверхности отклика при обосновании надежности системы аварийной защиты реактора.// Материалы 8 МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия. 2013.

2. Козлачков А.Н., Быков М.А., Сиряпин В.Н., Шеин В.П., Трибелев А.А. Применение методов статистического анализа при исследовании надежности аварийной защиты.// 24-й симпозиум AER, Сочи, Россия. 2014. 3. ГОСТ 26843-86. Реакторы ядерные энергетические. Общие требования к системе управления и защиты.

4. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика.// Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком», 2002.

5. Тадеусевич Р., Боровик Б., Гончаж Т., Леппер Б. Элементарное введение в технологию нейронных сетей с примерами программ.// Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком», 2011.

6. Катковский Е.А., Катковский С.Е., Никонов С.П. Методика создания кодов реального времени "best estimate" на основе искусственных нейронных сетей. // Материалы 8 МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия, 2013.

#### Контактная информация -

Козлачков Александр Николаевич, инженер-конструктор 1 категории, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» тел.: 8(4967)65-26-68, e-mail:Aleksandr-n-k@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 26.03.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 3 –14.

#### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВОЗМОЖНЫХ КОМБИНАЦИЙ ЗАВИСАНИЙ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СУЗ НА НАДЕЖНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИИ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ РУ ВВЭР

#### И.Н. Шестаков; В.Н. Сиряпин, к.т.н.; В.П. Шеин; А.А. Трибелев; В.А. Нерюев

(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

В статье изложены характерные проблемы анализа надежности системы аварийной защиты для ВАБ - снижение расчетного консерватизма моделей надежности и учет отказов по общей причине большого числа однотипных элементов. Проводится исследование влияния числа и комбинаций зависаний органов регулирования СУЗ на температуру повторной критичности. По результатам исследования вводится принцип учета только «опасных» комбинаций зависаний ОР СУЗ в анализах надежности, что позволяет получить реалистические показатели надежности системы АЗ.

**Ключевые слова:** вероятностный анализ безопасности, анализ надежности, ВВЭР, система аварийной защиты, органы регулирования, зависания, комбинаторика.

ANALYSIS OF EFFECTS OF POSSIBLE COMBINATIONS OF STUCK CPS CONTROL RODS ON RELIABILITY OF VVER REACTOR TRIP SYSTEM FUNCTION / I.N. SHESTAKOV; V.N. SIRYAPIN, DSC (ENG.); V.P. SHEIN; A.A TRIBELEV; V.A. NERYUEV // The paper presents typical problems of reactor trip system reliability analysis for PSA, i.e. reduction in reliability model calculation conservatism and consideration of common-cause failures for a wide range of single-type components. A study covers effect of a number of CPS control rods stuck and their combinations on recriticality temperature. The principle of consideration of only "hazardous" sticking combinations of control rods has been introduced in reliability analyses by the results of study that enables to obtain realistic reliability parameters for the reactor trip system.

*Key Words:* probabilistic safety assessment, reliability analysis, VVER, reactor trip system, control rods, sticking, theory of combinations.

#### Введение

Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) энергоблока атомной станции (АС) системный анализ безопасности энергоблока АС, в процессе которого разрабатываются вероятностные модели, определяются значения вероятностных показателей безопасности. Результаты ВАБ используются для качественных и количественных оценок уровня безопасности энергоблока АС и выработки решений при проектировании, сооружении и эксплуатации энергоблока AC [1].

Анализы надежности систем и оборудования являются составной частью вероятностного анализа безопасности. Целью такого анализа надежности является разработка необходимых моделей надежности систем и оценка показателей надежности систем и элементов для включения в общую модель ВАБ.

Система аварийной защиты (АЗ) реактора является одной из наиболее важных систем безопасности. От ее надежности во многом зависит безопасность реакторной установки в целом.

Данная статья посвящена ряду проблем анализов надежности - проблеме учета отказов по общей причине и проблеме снижения консерватизма моделей надежности.

Система аварийной защиты реактора включает в себя электрическую и механическую части. Механическая часть системы управления и защиты (СУЗ) состоит из значительного числа органов регулирования (ОР) (для проектируемых блоков с ВВЭР до 121 ОР СУЗ, на действующих блоках – 61, 89, 103 и др.).

Элементами механической части, отказы которых могут вызвать невыполнение функции АЗ, являются:

- привод СУЗ;
- поглащающие стержни (ПС) СУЗ;
- направляющие каналы ТВС.

Функцией механической части СУЗ при аварии является перевод активной зоны в подкритическое состояние путем сброса поглощающих стержней в активную зону реактора и поддержание ее в подкритическом состоянии при расхолаживании.

Учет отказов по общим причинам является важной и сложной частью анализа надежности систем. При выполнении анализа встает вопрос о снижении консервативности в моделях надежности. В ряде случаев это существенно влияет на итоговый результат - вероятность функционального отказа системы.

Сложность учета отказов системы АЗ по общей причине заключается в большом количестве элементов и сложности модели учета их резервирования. В настоящее время для анализа надежности механической части системы аварийной защиты реакторной установки (РУ) при учете отказов по общей причине используется консервативный метод, рассматривающий комбинации зависаний, определенные на основе нейтроно-физических расчетов застреваний наиболее эффективных стрежней.

Такой метод требует дальнейшего развития. В частности, необходимо снижение чрезмерного консерватизма при количественной оценке надежности, что позволит получить более реалистичные оценки вероятности отказа механической части системы аварийной защиты.

При выполнении анализа надежности критерием отказа механической части СУЗ принимается такая комбинация застреваний ПС СУЗ, при которой становится невозможным достижение подкритичности (с учетом повторной критичности) в случае возникновении исходного события, требующего срабатывания АЗ.

Целью данного исследования ставилось решение следующих задач:

– исследование влияния расположения, количества зависших ОР СУЗ и их комбинаций на значение температуры повторной критичности;

 корректировка модели надежности механической части системы АЗ с использованием результатов исследования для построения более реалистической модели надежности.

#### Влияние комбинаций отказов приводов ОР СУЗ на $T_{\rm пк}$

Для анализа надежности аварийной защиты были проведены нейтронно-физические расчеты при застревании ОР СУЗ. Расчеты проводились на крупносеточной трехмерной двухгрупповой диффузионной программе БИПР-7А [2]. Определялось влияние застревания различного количества ОР СУЗ на температуру повторной критичности.

Исследование проводилось для стационарной загрузки активной зоны и 103 ОР СУЗ (прототип - Тяньваньская АЭС, блоки 3, 4).

В качестве критерия выполнения функции безопасности АЗ (безопасного состояния реактора) принята температура повторной критичности *T*<sub>пк</sub><150°С. Такое значение температуры теплоносителя первого контура характерно для РУ после перехода в «горячее» состояние в результате переходных процессов, не требующих немедленного дальнейшего расхолаживания (например, для ряда инициирующих событий (ИС), не связанных с разгерметизацией первого или второго контура). Поскольку в соответствии с регламентом эксплуатации до начала расхолаживания персонал должен обеспечить стояночную концентрацию борной кислоты в теплоносителе первого контура, достижение повторной критичности для таких ИС вследствие отказов механической части становится маловероятным.

Схема расположения ОР СУЗ в активной зоне представлена на рисунке 1.

В таблице 1 приведены опасные комбинации зависаний ОР СУЗ с точки зрения возникновения повторной критичности. Принималось, что ОР СУЗ застревают в крайнем верхнем положении.

Как видно из таблицы 1, органом регулирования, наиболее влияющим на выполнения функции АЗ, является орган, установленный в ТВС № 147. Результаты расчетов, приведенные в таблице 1, показывают, что превышение критерия  $T_{\text{пк}}$ <150°С происходит только при зависании 3 и более ОР.



Рис.1. Схема расположения ОР СУЗ в активной зоне (верхнее число – номер ТВС, (нижнее число – номер группы ОР СУЗ). Выделены ТВС с застрявшими ОР СУЗ, образующие связную область

В таблице 2 приведена температура повторной критичности при различных сочетаниях других ОР, застрявших в крайнем верхнем положении.

Как видно из таблицы 2, не все комбинации зависания ОР (3 и более) приводят к нарушению указанного выше критерия. Комбинации, не приводящие к нарушению критерия по температуре повторной критичности, исключаются из дальнейшего рассмотрения в анализе надежности.

Рассмотрим зависимость температуры повторной критичности от числа зависших ОР. Наблюдаемая тенденция увеличения температуры повторной критичности при увеличении числа зависших ОР СУЗ - хотя и сохраняется, но уже не в такой мере очевидна. В большей степени влияют именно комбинации зависших ОР СУЗ.

Анализируя зависимость между местом расположения застрявшего ОР (номер TBC) и температурой повторной критичности, приходим к выводу, что критерий  $T_{\Pi K} < 150^{\circ}$ С превышается в случае, если комбинация зависших ОР образует «связную» область, т.е. TBC, к которым относятся зависшие ОР, либо граничат друг с другом хотя бы одной гранью, либо примыкают к одиночным или «связным» TBC, под которыми ОР СУЗ не размещаются.

#### Корректировка расчетного метода определения полной вероятности отказа механической части системы аварийной защиты

Для оценки надежности системы аварийной защиты с учетом отказов по общей причине по результатам исследования применен принцип группирования комбинаций зависания ОР СУЗ на «опасные» и «безопасные»

Таблица 1

Количество застрявших ОР	Номера ТВС с застрявшими ОР	<i>Т</i> <sub>пк</sub> , °С
0	-	< 20
1	147	< 20
2	147, 137	118
3	147, 137, 126	166
4	147, 137, 126, 136	190
5	147, 137, 126, 136, 125	213
6	147, 137, 126, 136, 125,146	229
7	147, 137, 126, 136, 125,146, 114	238
8	147, 137, 126, 136, 125,146, 114, 113	248
9	147, 137, 126, 136, 125,146, 114, 113, 112	256
10	147, 137, 126, 136, 125,146, 114, 113, 112, 135	263
11	147, 137, 126, 136, 125, 146, 114, 113, 112, 135, 101	268
12	147, 137, 126, 136, 125, 146, 114, 113, 112, 135, 101, 100	277

#### Температура повторной критичности при наиболее опасных комбинациях зависших **ОР**

Таблица 2

Количество застрявших ОР	Номера ТВС с застрявшими ОР	<i>Т</i> <sub>пк</sub> , °С
2	147, 146	47
2	147, 136	34
2	147, 126	53
2	147, 135	< 20
2	113, 114	< 20
2	100, 101	< 20
2	135, 112	< 20
2	110, 114	< 20
2	96, 146	< 20
3	147, 137, 125	137
3	147, 137, 136	153
3	147, 137, 146	146
3	147, 137, 135	123
3	147, 137, 114	129
3	147, 137, 112	120
3	111, 112, 113	< 20
3	111, 112, 98	< 20
3	135, 136,146	< 20
3	111, 123, 110	< 20
3	123, 135 146	< 20
3	96, 101, 146	< 20
3	98, 96, 123	< 20
3	98, 100, 125	< 20
3	146, 123, 96	< 20
3	110, 112, 114	< 20
3	112, 113, 126	< 20
4	147, 137, 126, 114	185
4	147, 137, 126, 113	174
4	147, 137, 126, 125	187
4	147, 137, 126, 146	181
4	110, 111, 112, 113	< 20
4	110, 123, 135, 146	< 20
4	96, 110, 123, 135	< 20
4	96, 111, 125, 135	< 20
4	110, 111, 112, 136	< 20
4	135, 125, 98, 110	< 20
4	111, 112, 136, 137	34
4	96, 100, 123, 126	< 20
4	135, 146, 101, 100	< 20
5	137, 136, 125, 113, 100	91
5	96, 110, 123, 135, 146	< 20
5	147, 137, 126, 136, 101	193
5	98, 111, 112, 101, 114	104
5	135, 125, 126, 100, 101	91
5	110, 111, 112, 135, 146	< 20
5	96, 111, 113, 101, 136	< 20

#### Температура повторной критичности при различных сочетаниях зависших ОР

Количество застрявших ОР	Номера ТВС с застрявшими ОР	<i>Т</i> <sub>пк</sub> , °С
6	137, 136, 125, 113, 100, 101	117
6	96, 98, 110, 111, 112, 146	< 20
6	100, 101, 111, 112, 135, 136	39
6	101, 114, 126, 96, 123, 146	150
6	96, 98, 100, 123, 125, 146	< 20
7	96, 110, 123, 135, 146, 111, 136	53
7	96, 110, 123, 98, 112, 125, 100	< 20
7	100, 101, 110, 111, 112, 136, 137	77
7	96, 98, 100, 146, 123, 125, 114	< 20

комбинации. Исключаются из рассмотрения «безопасные» комбинации зависания.

Поиск «опасных» комбинаций построен на выявлении числа комбинаций зависания, образующих «связную» область.

Вероятность отказа *k* ОР СУЗ в расчетной модели надежности определяется по формуле [3, 4]:

$$Q_k = Qn_k + Q_{CCF_k} \tag{1}$$

где:  $Q_k$  - вероятность отказа *k* ОР СУЗ;

 $Qn_k$  – вероятность независимых отказов k ОР СУЗ;

 $Q_{CCF}$  – вероятность отказа k компонентов, входящих в группу отказов по общей причине; k – число отказавших компонентов.

С учетом результатов исследования комбинаций отказов получаем следующую формулу для определения вероятности отказа kОР СУЗ:

$$Q_{\kappa o p_k} = \left(Q n_k + Q_{CCF_k}\right) \cdot \frac{z_k}{C_m^k} \tag{2}$$

где:  $Q_{\kappa o p_k}$  - вероятность отказа k ОР СУЗ, определённая с учетом результатов исследования;  $z_k$  - число «опасных» комбинаций для k застрявших ОР СУЗ;

 $C_m^{\ k}$  – число возможных комбинаций зависания k стержней.

*т* – общее число ОР СУЗ.

Для определения числа «опасных» комбинаций разработана специальная программа, вычисляющая количество «связных» областей из заданного числа *k* застрявших ОР СУЗ.

В таблице 3 приведены результаты анализа надежности механической части системы АЗ, рассчитанные по консервативной методике и методике, учитывающей результаты настоящего исследования. В этих расчетах для количественного определения показателей надежности в качестве исходных данных, для примера, используется некоторая произвольная статистика зависания ОР СУЗ.

Как видно из таблицы 3, данная методика позволяет обосновано снизить значение полной вероятности отказа k ОР СУЗ на 1-3 порядка для количества зависших ОР 2 и более,

Таблица 3

	Вероятность отказа k OP СУЗ рассчитанная по:				
Число застрявших ОР СУЗ	консервативной методике	методике, учитывающей результаты исследования			
1	3,7.10-4	3,7.10-4			
2	<b>4</b> , <b>4</b> ·10 <sup>-7</sup>	1,4.10-8			
3	1,2.10-6	2,7.10-9			
4	2,8.10-6	5,9·10 <sup>-10</sup>			
5	4,9.10-6	1,3.10-10			
6	7,4.10-6	2,8.10-11			
7	9,4.10-6	6,3·10 <sup>-12</sup>			

Результаты анализа надежности механической части системы АЗ

что позволяет рекомендовать её для использования в ВАБ.

#### Результаты исследования

По результатам исследования сформулирован и применён принцип учета только «опасных» комбинаций зависаний при проведении анализа надежности механической части системы АЗ, что привело к снижению расчетного консерватизма и получению более реалистических оценок.

Результаты данного исследования соответствуют результатам расчетного обоснования эффективности и достаточности механической части системы АЗ (числа ОР) для выполнения её функций.

Планируется проведение аналогичного исследования для ряда блоков с 61 и 121 ОР СУЗ и различным их расположением по сечению активной зоны для распространения откорректированной методики на другие блоки.

#### Заключение

Проведено исследование влияния комбинаций зависаний ОР СУЗ на температуру повторной критичности. Проведена корректировка модели надежности механической части АЗ с использованием результатов исследования. Показан порядок снижения консерватизма при использовании откорректированной модели надежности.

#### Список литературы

1. РБ-024-11. Положение об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для внутренних инициирующих событий для всех режимов работы энергоблока атомной станции // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2011.

2. Программа для ЭВМ. Программа расчета нейтронно-физических характеристик активной зоны реакторов ВВЭР. БИПР-7/А (версия 1.3). Колл. авт. - М.: РНЦ КИ, 2001.

3. Mosleh A., Rasmuson D.M., Marshall F.M. Guidelines on Modeling Common-Cause Failures in Probabilistic Risk Assessment, NUREG/CR-5485.// US Nuclear Regulatory Commission, 1998.

4. Best estimate safety analysis for NPP: Uncertainty Evaluation. IAEA, - Vienna, 2008.

#### Контактная информация -

Шестаков Илья Николаевич, инженер-конструктор 2 категории, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», тел.: +7(4967)65-26-03, e-mail: shestakov\_in@grpress.podolsk.ru

Статья поступила в редакцию 02.04.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 15 – 20.

#### ВОПРОСЫ КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОСТИ РУ ВВЭР

#### М.А. Подшибякин, к.т.н.; В.М. Васин, к.т.н.; А.В. Кирсанов, к.т.н.; М.М. Гермаш; Н.А. Стребнев, к.т.н.; А.В. Мартынов; А.К. Подшибякин, к.т.н. (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

В соответствии с концепцией глубоко эшелонированной защиты (ГЭЗ) технические и организационные мероприятия по защите физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду должны осуществляться на всех 5-ти уровнях ГЭЗ. Система представления параметров безопасности (СППБ), являясь частью системы поддержки оперативного персонала АЭС, используется при принятии решений по управлению энергоблоком на 1-ом – 4-ом уровнях ГЭЗ. Для СППБ предложено следующее определение параметров безопасности (ПБ): ПБ – это контролируемые параметры РУ и АЭС, характеризующие состояние функций безопасности и эффективность их выполнения по обеспечению целостности физических барьеров. Рассматривается взаимосвязь ПБ с функциями безопасности, эксплуатационными процедурами и процедурами управления авариями. Анализируются способы выбора ПБ и установления связи этих параметров с пределами безопасной эксплуатации, проектными пределами и критериями безопасности. Анализируется эффективность использования ПБ при разработке событийно- и симптомно-ориентированных инструкций по управлению авариями, а также при нормальной эксплуатации РУ и АЭС и эксплуатации с отклонениями.

**Ключевые слова:** функции безопасности, система поддержки оперативного персонала, глубоко эшелонированная защита, параметры безопасности, РУ ВВЭР.

**CONCEPTUAL ISSUES ON CREATION OF VVER RP SAFETY PARAMETER DISPLAY SYSTEM / M.A.PODSHIBYAKIN, DSC (ENG.); V.M.VASIN, DSC (ENG.); A.V.KIRSANOV, DSC (ENG.); M.M.GERMASH; N.A.STREBNEV, DSC (ENG.); A.V.MARTYNOV; A.K.PODSHIBYAKIN, DSC (ENG.)** // According to the concept of defense-in-depth, technical and organizational measures on protection of physical barriers on the way of propagation of ionizing radiation and radioactive substances into the environment shall be provided with all 5-levels of defense-in-depth. Safety parameter display system (SPDS), being a part of supporting system of NPP operational personnel is used at decision-making for power unit control with the 1-st – 4-th levels of defense-in-depth. For SPDS the following definition of safety parameters (SP) is offered: SP are RP and NPP parameters under control characterizing the state of safety functions and efficiency of their fulfillment as to maintenance of integrity of physical barriers. Interrelation between SP and safety functions, operational procedures and accident management procedures is considered. The ways of choice of SP and establishment of relation of these parameters with limits of safe operation, design limits and safety criteria are analyzed. Efficiency of SP application is analyzed during elaboration of event-and symptom- oriented instructions on accident management and also during RP and NPP normal operation and anticipated operational occurrences.

*Key Words:* safety functions, supporting system of operational personnel, defense-in-depth, safety parameters, *VVER RP.* 

#### Введение

После аварии 28 марта 1979 года на АЭС ТМІ-2 в США с частичным расплавлением активной зоны системы представления параметров безопасности (СППБ) стали разрабатываться и внедряться на АЭС как системы поддержки оперативного персонала для обеспечения правильности действий при принятии решений по управлению аварией.

Авария на АЭС Чернобыль-4 и на АЭС «Фукусима», получившие катастрофическое

развитие, дополнительно продемонстрировали последствия неэффективного управления авариями.

Проблема обеспечения эффективного управления актуализировалась как в аспекте создания дополнительных технических средств управления, так и в аспекте совершенствования процедур управления авариями оперативным персоналом. Не должно вызывать сомнений, что оперативному персоналу АЭС для осуществления эффективных действий необходимо контролировать все процессы, происходящие в РУ и АЭС и влияющие на состояние физических барьеров на пути распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в окружающую среду. В распоряжении оперативного персонала должны быть как соответствующие технические средства, так и обоснованные процедуры предотвращения аварий и смягчения их последствий в случае возникновения.

Системы поддержки оперативного персонала относятся к техническим средствам, непосредственно связанным с процедурами управления РУ и АЭС.

В докладе рассматриваются вопросы концепции создания СППБ в связи с необходимостью иметь углубленное понимание роли этой системы в управлении энергоблоком на всех уровнях глубоко эшелонированной защиты (ГЭЗ) с учетом современных требований, ориентированных как на повышение безопасности АЭС, так и на повышение экономической эффективности их эксплуатации.

#### Принципиальные положения концепции создания СППБ

Базовым принципиальным положением концепции создания СППБ является постулат о взаимосвязи состояний физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных продуктов в окружающую среду с состояниями функций безопасности (ФБ).

В соответствии с требованиями эксплуатирующих организаций акцентируется внимание на то, что СППБ предназначена для информационной поддержки действий оперативного персонала блочного пункта управления при принятии решений по предупреждению аварий и ограничению их последствий за счет:  контроля эффективности обеспечения целостности физических барьеров на пути распространения радиоактивных веществ и ионизирующего излучения;

 упреждающего информирования персонала об угрозе нарушения целостности какого-либо из физических барьеров и об эффективности действий по предотвращению аварий и смягчению последствий аварий.

Целью разработки СППБ является представление оператору информации о состоянии ФБ в реальном масштабе времени и эффективности выполнения этих функций при отклонениях от нормальной эксплуатации и при нарушении нормальной эксплуатации, включая проектные и запроектные аварии.

Учитывая большой объем информации, с которой приходится иметь дело оператору, одной из задач при организации контроля ФБ является снижение информационной нагрузки на оператора (принцип минимизации информации).

Исходя из основной задачи СППБ оказания помощи оперативному персоналу в быстрой оценке состояния безопасности РУ и АЭС, количество ФБ, входящих в СППБ, должно быть минимизировано. В СППБ должны включаться только те ФБ, которые оказывают прямое воздействие на состояние топливной матрицы, оболочки твэла, границы контура теплоносителя реактора, герметичного ограждения реакторной установки и биологической защиты во всех состояниях энергоблока. При этом оперативному персоналу должна представляться информация для принятия решений по управлению энергоблоком на четырех уровнях ГЭЗ с целью предотвращения перерастания отклонений от нормальной эксплуатации в предаварийные ситуации и проектные аварии, а если это оказалось невозможным, то предотвращения развития последних в запроектные аварии с тяжелыми повреждениями активной зоны. Задача представления информации оперативному персоналу для управления тяжелыми запроектными авариями в настоящее время перед СППБ не стоит, так как для контроля процессов при этих авариях предусматривается специальный КИП.

Однако принципиальная возможность для включения параметров, контролируемых этим КИП, также как и других параметров, необходимость контроля которых может выявиться в процессе эксплуатации, должна быть предусмотрена в СППБ, т.е. в системе должны быть предусмотрены определенные запасы на развитие. Это должна быть открытая система.

К концептуальным положениям относится также и вопрос определения набора параметров, определяющих состояние ФБ.

Предложено следующее определение параметров безопасности для СППБ: «Параметры безопасности (ПБ) – это контролируемые параметры РУ и АЭС, характеризующие состояние ФБ и эффективность их выполнения по обеспечению целостности физических барьеров».

Исходя из принципа минимизации информации, представляемой оператору СППБ, количество ПБ должно быть также минимизировано, как и количество ФБ. Вместе с тем, задачей разработки СППБ является не только определение набора ПБ, но и определение их предельных значений для различных состояний ФБ. В этой связи появляется необходимость введения термина «входные параметры». Этот термин также должен иметь свое определение.

На основе имеющегося опыта «входные параметры» определяются как условия,

которым соответствуют заданные в системе предельные значения ПБ для различных состояний ФБ. Таким образом, в данном случае просматривается взаимосвязь, аналогичная комбинациям «пределы и условия нормальной эксплуатации», «пределы и условия безопасной эксплуатации». В данном случае - это комбинация «параметры безопасности – входные параметры».

Принципиально часть входных параметров может быть отнесена к ПБ. Их соотношение должно определяться при создании конкретных систем с учетом особенностей проектов.

При определении предельных значений ПБ важно установить связь этих параметров с эксплуатационными пределами, уставками на срабатывание систем безопасности, пределами безопасной эксплуатации, проектными пределами и критериями безопасности. Эти связи показаны на рисунке 1.

Данные на рисунке 1 – это модифицированная шкала проектных пределов [1] при работе на энергетических уровнях мощности с включением в неё областей изменения ПБ на уровнях 1-4 ГЭЗ. Связи, представленные



*Рис.1.* Шкала проектных пределов для состояний РУ и АЭС при работе на энергетических уровнях мощности

Н – номинальный режим; САР – системы автоматического регулирования; ТЗБ – технологические защиты и блокировки (для нормальной эксплуатации); СБ – системы безопасности; ПБЭ – пределы безопасной эксплуатации; ППА – проектные пределы для аварий; ЭП - эксплуатационные пределы в области параметров эксплуатационных переходных режимов; ДППБ – допустимые пределы параметров безопасности; ГЭЗ – глубоко эшелонированная защита.

\* Стационарный режим – режим работы на постоянном (заданном) уровне мощности с отклонениями параметров от номинальных значений, вызванных погрешностью измерения и поддержания при работе САР. \*\* Термин взят из Руководства МАГАТЭ.

\*\*\* В данном случае ДППБ на 4-ом уровне ГЭЗ соответствуют стадии предотвращения развития запроектных аварий в тяжелые запроектные аварии. на рисунке 1 в привязке к категориям проектных режимов, проиллюстрированы на рисунке 2 [2].

На рисунке продемонстрировано, что на 1-ом и 2-ом уровнях ГЭЗ предельные значения ПБ могут выбираться равными эксплуатационным пределам и уставкам на срабатывание систем безопасности. На 3-ем и 4-ом уровнях ГЭЗ они могут приниматься равными пределам безопасной эксплуатации и проектным пределам аварий.

В качестве ПБ могут приниматься и так называемые «приемочные критерии для анализов аварий», которые обозначают другим термином перечисленные выше проектные пределы.

В соответствии с имеющейся практикой, состояния ФБ классифицируются на следующие:

- удовлетворительное (нормальное);
- неудовлетворительное;
- тяжелое;
- экстремальное.

К удовлетворительному состоянию относятся состояния, при котором ни один ПБ не превышает эксплуатационные пределы. К неудовлетворительному состоянию относятся состояния, при котором хотя бы один ПБ превышает эксплуатационный предел, но не превышает предел безопасной эксплуатации.

К тяжелым состояниям относится область проектных и запроектных аварий без превышения ПБ проектных пределов (критериев безопасности), установленных для проектных аварий.

К экстремальным состояниям относится область запроектных аварий, в которой имеет место превышение ПБ проектных пределов (критериев безопасности), установленных для проектных аварий, т.е. это область тяжелых запроектных аварий.

ПБ, соответствующие каждому из перечисленных состояний ФБ, и их предельные значения должны быть определены для всех состояний РУ и АЭС, которые могут реализовываться при эксплуатации с учетом внешних и внутренних воздействий.

Для получения представительного набора ПБ и определения их предельных значений должны быть рассмотрены сценарии, относящиеся к отклонениям от нормальной



Рис.2. Проектные пределы и параметры переходного процесса

(1) – эксплуатационные переходные режимы (режимы категории 1)

(2) – режимы эксплуатации с отклонениями без достижения уставок на срабатывание СБ (режимы категории 2),

(3) – предаварийные ситуации без превышения предела безопасной эксплуатации (режимы категории 2),

(4) — предаварийные ситуации и аварии с превышением предела безопасной эксплуатации (режимы категорий 3 и 4).

эксплуатации, проектным авариям и запроектным авариям. Принципиально, рассмотрение этих сценариев необходимо и для обоснования событийно и симптомно-ориентированных инструкций.

Таким образом, разработка СППБ должна быть увязана с работами по разработке эксплуатационных и аварийных процедур и их обоснованием. Функциональные связи, учитываемые при создании СППБ, показаны на рисунках 3 и 4.

Следуетиметь в виду, что фрагменты, представленные на блок-диаграммах, во взаимосвязи означают проведение взаимоувязанных работ в течении всего жизненного цикла РУ и АЭС с учетом возможных модернизаций и обратных связей по опыту эксплуатации данного типа РУ и АЭС.

На этапе начала разработки СППБ для установления связей ПБ с ФБ и определения предельных значений ПБ должны рассматриваться проектные режимы, соответствующие уровням 1-4 ГЭЗ.

В соответствии с имеющейся практикой СППБ должна реализовываться как трехуровневая структура, содержащая на первом уровне форматы «Состояния ФБ», на втором -«Деревья состояний ФБ» и на третьем уровне -«Поддерживающие форматы».

Формат «Состояния ФБ» должен обеспечить возможность быстрого обнаружения отклонений ПБ от ПБ нормального состояния и контроль эффективности выбранных действий по восстановлению ФБ работой автоматики и действиями персонала в соответствии с инструкциями. Это обобщенный сигнальный формат информационной структуры СППБ.

Формат «Деревья состояний ФБ» должен содержать деревья состояний ФБ, обеспечивающие идентификацию нарушения ФБ и тяжесть этого нарушения.



#### *Рис.3.* Блок-диаграмма. Функциональные связи, учитывающиеся при создании СППБ

\* К этой категории процедур относятся процедуры, применяемые при нормальной эксплуатации и при ликвидации отклонений от нормальной эксплуатации. \*\* В настоящее время на АЭС с ВВЭР симптомноориентированные инструкции на этих уровнях ГЭЗ не применяются, но в СППБ не исключается возможность такого применения.



#### *Рис.4*. Блок-диаграмма. Функциональные связи, учитывающиеся при создании СППБ

\* При принятии симптомно-ориентированных процедур в качестве основного метода управления аварией необходимо также стремиться идентифицировать исходное событие для возможной оптимизации процесса управления аварией. \*\* В процессе управления авариями часть ФБ относятся к критическим функциям безопасности (КФБ). «Поддерживающие форматы» могут содержать другую информацию, которая может потребоваться для принятия решений.

Выполнение функций СППБ должно быть обеспечено на основе контроля параметров, предусмотренных в АСУ ТП.

#### Примеры разработки требований к СППБ со стороны РУ

Приведенные здесь примеры разработки требований к СППБ относятся к проекту РУ В-320 и ориентированы на реализацию на 3-ем энергоблоке Ростовской АЭС.

Прежде всего о наборе ФБ.

В соответствии с принципом минимизации информации для оператора в рамках СППБ предполагается реализация контроля следующих ФБ:

 ФБ1 «Аварийный останов реактора и обеспечение подкритичности активной зоны реактора»;  ФБ2 «Охлаждение активной зоны реактора»;

 ФБЗ «Охлаждение бассейна выдержки»;

ФБ4 «Отвод тепла от первого контура ко второму»;

 ФБ5 «Обеспечение целостности первого контура»;

 ФБ6 «Обеспечение запаса теплоносителя»;

 ФБ7 «Обеспечение целостности герметичного ограждения».

Остальные ФБ [3] должны контролироваться в соответствии с технологическим регламентом безопасной эксплуатации и соответствующими инструкциями, включающими инструкции по управлению авариями.

Связь ФБ с эксплуатационными состояниями энергоблока представлена в таблице 1. Связь ФБ с группами проектных режимов представлена в таблице 2.

Группы проектных режимов, представленные в таблице 2, относятся к режимам

Таблица 1

		Эксплуатационное состояние							
Номер ФБ	ФБ	«Холодное» состояние	«Горячее» состояние	«Реактор на МКУ мощности»	«Работа на мощности»	«Останов для ремонта»	«Перегрузка топлива»		
		А	В	С	Д	Е	К		
1	Аварийный останов реактора и обеспечение подкритичности активной зоны реактора	+	+	+	+	+	+		
2	Охлаждение активной зоны реактора	+	+	+	+	+	+		
3	Охлаждение БВ	+	+	+	+	+	+		
4	Отвод тепла от первого контура ко второму		+	+	+				
5	Обеспечение целостности первого контура	+	+	+	+				
6	Обеспечение запаса теплоносителя	+	+	+	+	+	+		
7	Обеспечение целостности ГО	+	+	+	+	+	+		
Примеча	ание – Знак «+» озна	чает необходим	ость рассмотр	ения ФБ для конкр	етного состояния	!			

#### Связь эксплуатационных состояний с ФБ

# Таблица 2

# Связь групп проектных режимов с ФБ

				Группы про	ектных режимов			
ΦĒ	Увеличение теплоотвода от первого контура	Уменьшение теплоотвода от первого контура	Уменьшение расхода теплоносителя первого контура	Изменения реактивности и распределения энерговыделения в активной зоне	Увеличение массы теплоносителя первого контура	Уменьшение массы теплоносителя первого контура	Нарушения в транспортно- технологических операциях	Нарушение охлаждения БВ
	Группа №1	Группа №2	Группа №3	Группа №4	Группа №5	Группа №6	Группа №7	Группа №8
Аварийный останов реактора и обеспечение подкритичности активной зоны реактора	+	*+	*+	*+	*+	*+	* ** +	***+
Охлаждение активной зоны реактора	+	+	+	+	+	+	+	
Охлаждение БВ							+	+
Отвод тепла от первого контура ко второму	+	+	+	+	+	* *+		
Обеспечение целостности первого контура	+	+	+	+	+	+		
Обеспечение запаса теплоносителя первого контура	+	+	+	+	+	+	+	
Обеспечение целостности ГО	+	+	+	+	+	+	+	+

\* В ряде режимов необходим «останов реактора»

\*\* При малых течах

\*\*\* В данном случае ФБ «Обеспечение подкритичности топлива в БВ»

Примечание – Знак «+» означает рассмотрение данной ФБ для конкретной группы проектного режима



(1) (2) (3) - TOHEN CORT

Рис. 5. Алгоритм определения состояния ФБ1 «Аварийный останов реактора и обеспечение подкритичности активной зоны peaktopa»

нарушения нормальной эксплуатации и включают проектные аварии. Принципиально эти группы применимы и к запроектным авариям, которые также учитываются при разработке требований к СППБ. Разбиение режимов по категориям, относящимся к уровням 1-4 ГЭЗ, уже демонстрировалось ранее на рисунке 2. Определение предельных значений ПБ для всех состояний ФБ проведено в соответствии с принципами, рассмотренными выше.

В качестве примеров для ФБ1 «Аварийный останов реактора и обеспечение подкритичности активной зоны peaktopa» и ФБ2 «Охлаждение активной зоны реактора» приведены алгоритмы определения «Состояния ФБ» (рисунки 5 и 6 для ФБ1, рисунок 7 для ФБ2), а также состояния ФБ во взаимосвязи с ПБ, ДППБ и проектными пределами (таблица 3 для ФБ1 и таблица 4 для ФБ2).

Время 10 мин. После срабатывания АЗ включает в себя время, необходимое оперативному персоналу для проведения операций по увеличении концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура для создания требуемой подкритичности.



Рис. 6. Алгоритм определения состояния ФБ1 «Аварийный останов реактора и обеспечение подкритичности активной зоны peaktopa»

Наборы ПБ и количество ФБ приведены в соответствии с принципом минимизации информации, представляемой оператору в рамках СППБ для оказания помощи оперативному персоналу в быстрой оценке состояния безопасности эксплуатации энергоблока и эффективности управления авариями и ликвидации отклонений от нормальной эксплуатации.

Приведенные численные значения ПБ являются предварительными и подлежат уточнению в процессе создания СППБ и испытаниях при вводе её в эксплуатацию.

#### Отдельные вопросы реализации СППБ

#### **O** npuopumemax

В соответствии с концепцией ГЭЗ [4] «Приоритетной является стратегия предотвращения неблагоприятных событий, особенно для уровней 1 и 2». Таким образом, прежде всего необходимо выявить физический барьер, который подвергается наибольшей опасности повреждения.

Так, например, в режимах с уменьшением теплоотвода от первого контура ФБ4 «Отвод тепла от первого контура ко второму» будет обладать 1-м приоритетом и действия оператора должны быть направлены, в первую Таблица 3

Состояния ФБ 1 во взаимосвязи с ПБ, ДШПБ и проектными пределами.

выполнени - для времб - для времб сигнала на отрицател концентра хонцентра допустимо ниснтрация выполняет равна мин 1) пери менее 1 2) нейт
Выполнени астреван - отсутстви или равно или равно или равно или равно совпадени «срабатыва совпадени - совпадени - совпадени
<ul> <li>Нейтронная</li> <li>мощность,</li> <li>иод реактора,</li> <li>отсутствие отсутствие реактора бо</li> <li>эной кислоты</li> </ul>
Іейтронная Нейтронная мощность инициирую



Рис. 7. Алгоритм определения состояния ФБ2 «Охлаждение активной зоны реактора» 1- работа на четырех ГНЦ  $\Delta T_s = 9^{\circ}C$ 2- работа на трех ГНЦ  $\Delta T_s = 14, 5^{\circ}C$ 3- работа на двух ГНЦ  $\Delta T_s = 17^{\circ}C$ 

очередь, на ликвидацию этого отклонения. В режимах с уменьшением запаса теплоносителя приоритетом будет обладать ФБ2, а при реактивностных авариях ФБ1.

Вместе с тем существует подход определения приоритетов, основанный на значимости физических барьеров на пути распространения радиоактивных продуктов [5]. В соответствии с этим подходом для ФБ, обеспечивающих прямую защиту оболочки твэл, устанавливается высший приоритет: 1-й приоритет ФБ1 и 2-й приоритет ФБ2, т.е. приоритетность соответствует последовательности барьеров.

Для управления запроектными авариями введены понятия «Критические функции безопасности (КФБ)» и стратегии управления авариями [6]. В этих случаях в ходе аварии из ФБ выделяются КФБ. Приоритеты КФБ определяются ходом аварийного процесса.

#### Надежность и классификация СППБ

Из рассмотренного выше следует, что СППБ должна относиться к системам важным для безопасности, как информационная система поддержки оператора. В этой связи существенной является информация, приведенная в докладе [7]. По приведенным в статье данным вклад ошибки персонала в вероятность ЗПА с плавлением активной зоны в проекте ВВЭР-ТОИ составляет 19,9%, в то время, как отказ СПОТ – 2,8 %.

Элементы системы должны быть высокого качества и надежности. СППБ должна быть рассчитана на внешние и внутренние воздействия, как и проекты РУ и АЭС.

Технологический регламент безопасной эксплуатации должен предусматривать компенсирующие мероприятия на период времени, когда СППБ находится в состоянии неготовности.

#### Использование параметров безопасности при разработке эксплуатационной документации

Так как ПБ характеризуют состояние физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду, а задачей эксплуатационных документов по обеспечению безопасности РУ и АЭС является установить процедуры своевременного выявления и ликвидации отклонений от проектных условий эксплуатации на всех уровнях ГЭЗ, то ПБ должны использоваться при разработке таких основных документов, как технологический регламент безопасной эксплуатации (ТРБЭ), событийно и симптомно-ориентированные инструкции по управлению авариями.

В соответствии с ТРБЭ должны соблюдаться пределы и условия нормальной эксплуатации и исключаться достижение пределов безопасной эксплуатации при соблюдении условий безопасной эксплуатации на 1-ом и 2-ом уровнях ГЭЗ. Успешные действия оперативного персонала на этих уровнях дают возможность не только исключить перерастание отказов в предаварийные ситуации и аварии, но и обеспечить работу РУ и АЭС на мощности.

Таким образом, использование СППБ обеспечивает реальную поддержку оперативному персоналу и по повышению экономической эффективности работы энергоблоков по выработке электроэнергии.

В соответствии с событийно и симптомноориентированными инструкциями задачей управления авариями на 3-м и 4-ом уровнях ГЭЗ является предотвращение перехода

# Таблица 4

# Состояния ФБ 2 во взаимосвязи с ПБ, ДШІБ и проектными пределами

e				
Примечание				
Состояние ФБ с достижением проектных пределов по рисунку 1 и рисунку 2	Эксплуатация с непревышением ЭП	Эксплуатация с отклонениями с непревышением IIБЭ	Предаварийная ситуация и ПА с непревышением ППА	ЗПА с превышением ППА
Предельные значения ПБ	$\Delta \Gamma_{s} = 9 \text{ °C} - 4 \Gamma \Pi H$ $\Delta \Gamma_{s} = 14,5 \text{ °C} - 3 \Gamma \Pi H$ $\Delta \Gamma_{s} = 17 \text{ °C} - 2 \Gamma \Pi H$	$\Delta T_s = 3$ °C	360 °C	> 360 °C
Параметры безопасности	запас до кипения <b>Δ</b> Тs	запас до кипения <b>Δ</b> Тs	Максимальная температура теплоносителя на выходе из теплонапряженной ТВС	Максимальная температура теплоносителя на выходе из теплонапряженной ТВС
Входные параметры	максимальная температура на выходе из TBC, температура насыщения $T_{\rm slk},$ состояние ГЦН	максимальная температура на выходе из TBC, температура насыщения $T_{\rm sik},$ состояние ГЦН	максимальная температура на выходе из TBC	максимальная температура на выходе из TBC
Состояние ФБ	Удовлетворительное	Неудовлетворительное	Тяжелое	Экстремальное

### Примечание:

Кроме входных параметров и параметров безопасности должны контролироваться параметры, предусмотренные технологическим регламентом безопасной эксплуатации PV и АЭС, такие как:

- мощность реактора; I
- распределение энерговыделений в активной зоне; расход теплоносителя через реактор; I
  - I
- давление теплоносителя в реакторе; I
- температура теплоносителя на входе в реактор; коэффициент запаса до кризиса теплообмена. 1 1

предаварийных ситуаций и проектных аварий в запроектные аварии. СППБ представляет технические средства, способствующие успешности этих действий.

Таким образом, разработка СППБ и указанных эксплуатационных документов должны координироваться как в части технологической, так и в части сценариев, используемых для обоснования этого комплекта документов.

#### Заключение

1. Сформулированы и предлагаются для обсуждения актуализированные принципиальные положения создания СППБ, как системы важной для безопасности.

2. Отмечено, что в современных условиях повышения требований к обеспечению безопасности АЭС при одновременном повышении требований к экономической эффективности эксплуатации повышается роль информационных систем поддержки оператора как в обеспечении безопасности на уровнях 3 и 4 ГЭЗ для предотвращения перехода ПА в ЗПА и ТЗПА, так и при ликвидации отклонений от нормальной эксплуатации на уровнях 1 и 2 ГЭЗ. Procedures for Nuclear Power Plants, - IAEA, Vienna, 2000.

3. Safety Reporty Series № 46. Assessment of Defence in Depth for Nuclear Power Plants, - IAEA, Vienna, 2005.

4. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций, - ОПБ-87/97, Москва, 1997.

5. Руководство по организации контроля состояния критических функций безопасности, - Концерн «Росэнергоатом», ВНИИАЭС, Москва, 1997.

6. Михальчук А.В., Севастьянов В.С., Семченков Ю.М., Суслов А.И. Методология разработки и расчетного обоснования комплекта симптомно-ориентированных аварийных инструкций для АЭС-2006. // Сборник докладов 5-ой МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, май 2007.

7. Морозов В. Проектом предусмотрено. Результаты вероятностного анализа безопасности проекта.// Ежемесячный журнал атомной энергетики России, Росэнергоатом, декабрь 2012, №12.

Контактная информация -

#### Подшибякин Михаил Александрович, начальник отдела, к.т.н., АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», тел.: +7(4967) 54-00-62, e-mail: pom@grpress.podolsk.ru

Статья поступила в редакцию 06.04.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 21 – 32.

#### Список литературы

1. Комментарии к «Общим положениям обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-87/97», - Труды НТЦ ЯРБ, 2004.

2. Safety Standards Series № NS-G-2.2. Operational Limits and Conditions and Operating

#### ВЕРИФИКАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ НЕЙТРОННОЙ КИНЕТИКИ КОДА ТРАП-КС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТОВ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ С ИЗМЕНЕНИЕМ РЕАКТИВНОСТИ

#### М.А. Увакин, к.ф.м.н.; Г.В. Алехин; М.А. Быков, к.т.н.; С.И. Зайцев

(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

Работа выполнена в рамках расчетов по верификации программного кода ТРАП-КС. Анализируются две тестовых задачи. В первой из них рассматривается несимметричный выброс органа регулирования СУЗ при работе на мощности. Данный процесс характеризуется быстрым вводом реактивности, приводящим к кратковременному локальному всплеску энерговыделения в реакторе. Во второй задаче рассчитывается эксперимент по исследованию ксеноновых колебаний. Инициируется введение небольшой отрицательной реактивности, в результате которого происходит снижение мощности реактора. Это снижение вызывает пространственные колебания концентрации ксенона, которые спустя некоторое время подавляются регулирующей группой при внешнем управлении.

**Ключевые слова:** верификация, код ТРАП-КС, реактивностные аварии, выброс ОР СУЗ, пространственные ксеноновые колебания, разрыв паропровода.

**TRAP-KS CODE PACKAGE THREE-DIMENSIONAL NEUTRON KINETICS MODEL VERIFICATION BY CALCULATION RESULTS OF BENCHMARKS WITH REACTIVITY VARIATIONS / M.A. UVAKIN, DSC (PH&M); G.V. ALEKHIN; M.A. BYKOV, DSC (ENG.); S.I. ZAITSEV //** This work is implemented within the frames of code package TRAP-KS verification. Two benchmarks are analyzed. The first of them considers asymmetric control rod ejection at power operation. This process is characterized by fast reactivity insertion leading to short-term local power surge in the reactor. The second benchmark covers the experiment with xenon oscillations. Small negative reactivity insertion leading to power decrease is initiated. This process results in space oscillations of xenon concentration. Some time later these oscillations are suppressed by control group under external control.

*Key words:* verification, *TRAP-KS* code package, reactivity-initiated accidents, *CPS* control rod ejection, space xenon oscillations, steam line rupture.

#### Введение

Выполнены расчеты верификапо ции программного кода ТРАП-КС. Этот модернизированной является веркод сией кода ТРАП-97. Это основной код, используемый для выполнения теплогидравлических расчетов аварийных процессов при обосновании безопасности РУ с ВВЭР. Однако, в аттестационных паспортах версии ТРАП-97 содержится следующее ограничение области применимости: «При анализе безопасности в реактивностных авариях со значительной деформацией поля энерговыделения в переходном процессе, а также в режимах без срабатывания аварийной защиты (ATWS) с

одновременным развитым кипением в активной зоне необходимо специальное обоснование консервативности результатов». Данное ограничение основано на использовании точечной модели нейтронной кинетики. Под обоснованием консервативности подразумевает выполнение поддерживающих расчетов с использованием трехмерной модели.

Версия ТРАП-КС имеет возможность расчета процессов перемешивания теплоносителя в камерах реактора и использования трехмерной модели нейтронной кинетики в активной зоне. Это позволяет снять указанное ограничение.

При верификации кода ТРАП-КС были использованы результаты испытаний на

действующих блоках АЭС с ВВЭР и результаты расчетов по другим аттестованным и верифицированным кодам.

В представленной работе анализируются результаты расчета тестовых задач. В первой из них рассматривается несимметричный выброс органа регулирования СУЗ при работе на мощности. Данный процесс характеризуется быстрым вводом реактивности, приводящим к кратковременному локальному всплеску энерговыделения в реакторе. Во второй задаче рассчитываются эксперименты по исследованию ксеноновых колебаний. В одном из экспериментов инициируется введение небольшой отрицательной реактивности, в результате чего происходит снижение мощности реактора. Это снижение вызывает пространственные колебания концентрации ксенона, которые спустя некоторое время подавляются регулирующей группой при внешнем управлении. Во втором эксперименте ксеноновые колебания возбуждаются за счет перемещения регулирующей группы СУЗ. Дополнительно приводятся результаты расчетов международной тестовой задачи V1000СТ-2 (задача 2) с разрывом паропровода и возникновением повторной критичности (6-й блок АЭС Козлодуй).

#### Расчётная модель

В качестве расчетных средств использовались коды ТРАП-КС [1] и КОРСАР/ГП [2], применяемые в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» для расчетов переходных процессов в РУ с ВВЭР. Нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора описывались при помощи библиотек макроскопических констант, полученных по программному комплексу САПФИР [3], [4].

Для сравнительного анализа использовались также результаты, полученные по коду РАДУГА [5]. Программный комплекс РАДУГА использует трехмерную двухгрупповую покассетную модель активной зоны и был аттестован для моделирования динамических процессов в реакторных установках с ВВЭР.

Нодализационная схема расчетной модели представляет собой часть полной контурной схемы, применяемой для расчетов переходных процессов на РУ с ВВЭР по кодам ТРАП-КС и КОРСАР/ГП. Активная зона моделируется 163 каналами (по числу ТВС), разделенными на 20 расчетных элементов по высоте. Протечки учитываются дополнительным каналом. В поперечном сечении для каждой ТВС принималась модель с 24 расчетными узлами. По два расчетных элемента снизу и сверху активной зоны служат для описания торцевого отражателя. Боковой отражатель учитывается в модели нейтронной кинетики за счет дополнительных ячеек на границе активной зоны. Трехмерная модель нейтронной кинетики описывается библиотекой нейтронных констант, включающей данные для каждого элемента активной зоны и отражателя.

Граничные условия моделируются следующим образом. На входе к каждому каналу подключен элемент «граничная ячейка», в котором определены удельная энтальпия (температура) и давление теплоносителя, соответствующие реальным величинам в установке. Выходы всех каналов расчетной модели подключены также к элементу типа «граничная ячейка», где заданы граничные условия на выходе из активной зоны. Величины расхода и распределение температуры в ТВС определяются при проведении расчета стационарного состояния и соответствуют заданному перепаду давления при описании граничных условий. Расчетная схема приведена на рисунке 1. Значения параметров РУ, заданные при определении



*Рис.1.* Схема расчетной модели с граничными условиями по давлению и температуре
Наименование характеристики	Значение
Тепловая мощность реактора, N <sub>ном</sub> , МВт	3000
Общий расход теплоносителя в холодных нитках, кг/с	16600
Давление теплоносителя на выходе из реактора, МПа	15,7
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	290
Исходная концентрация борной кислоты, г/кг	4,52

### Исходные параметры для расчетной модели

граничных условий расчетной модели, приведены в таблице 1.

### Выброс ОР СУЗ

Рассматривается стандартная задача с выбросом одного ОР СУЗ (ТВС № 112) за 0,1 с из крайнего нижнего положения в начале кампании первой топливной загрузки (1 эффективные сутки, 1 блок Ростовской АЭС). В исходном состоянии принимается стационарное отравление ксенона. Регулирующая группа находится в крайнем нижнем положении. Для определенности в качестве условий задачи был принят расчет без учета отклонений нейтронно-физических характеристик (эффективность СУЗ, суммарная доля запаздывающих нейтронов, коэффициенты реактивности по температуре теплоносителя и топлива, время жизни мгновенных нейтронов).

Извлечение стержня СУЗ из активной зоны приводит к резкому вводу положительной

реактивности, что вызывает всплеск нейтронной и тепловой мощностей реактора. Повышение мощности влечет за собой разогрев топлива, который вследствие отрицательной обратной связи приводит к снижению реактивности и стабилизации энерговыделения. Таким образом, рассматриваемая задача позволяет судить о точности моделирования нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в топливе и теплоносителе при быстром изменении мощности реактора после введения положительной реактивности.

Значения эффективного коэффициента размножения в стационарном состоянии по результатам расчета программ ТРАП-КС, КОРСАР/ГП и РАДУГА совпадают в пределах погрешностей определения этой величины указанными кодами. Распределения энерговыделения в стационарном состоянии по результатам расчета кодов ТРАП-КС и КОРСАР/ГП и РАДУГА представлены на рисунках 2 и 3. Данные расчетов по кодам ТРАП-КС и КОРСАР/ГП практически



*Рис.2.* Распределение мощности в стационарном состоянии (ТРАП-КС и КОРСАР/ГП)



*Рис.3.* Распределение мощности в стационарном состоянии (ТРАП-КС и РАДУГА)

совпадают, относительная разница не превышает 1%. Это объясняется одинаковым нейтронно-физическим модулем КАРТА, входящим в состав обоих программных комплексов. Данные расчетов по кодам ТРАП-КС и РАДУГА имеют определенные различия (до 7-8%), что, возможно, связано с использованием сеточного метода расчета потока нейтронов на границах ячеек или иной теплофизической модели твэла в программе РАДУГА.

Результаты сопоставления параметров установки в динамическом процессе по кодам ТРАП-КС, КОРСАР/ГП и РАДУГА представлены на рисунках 4-12. Отклонения полей энерговыделения в момент достижения максимальной мощности (порядка 0,1 с) в целом не более, чем для стационарного состояния. Изменение основных параметров показывает хорошую согласованность результатов для начального и конечного (начиная с 5 с) состояний активной зоны. По ходу процесса наблюдается ряд отличий (порядка 5-7 %) в пространственном распределении энерговыделения кодов ТРАП-КС и КОРСАР/ ГП с кодом РАДУГА, что влечет за собой и различия в значениях других параметров. Так, например, изменение максимальной температуры топлива показывает, что в модели кода РАДУГА разогрев топлива меньше, чем в кодах ТРАП-КС и КОРСАР/ГП. Это объясняется тем, что из-за разницы в полях энерговыделения уже на момент начала динамического процесса максимальная температура топлива отличается примерно на 100°С.



*Рис.4.* Распределение мощности в момент времени 0,1 с (ТРАП-КС и КОРСАР/ГП)



*Рис.6.* Изменение относительной мощности энерговыделения в процессе выброса ОР СУЗ



*Рис.5.* Распределение мощности в момент времени 0,1 с (ТРАП-КС и РАДУГА)



*Рис.* 7. Изменение максимальной температуры топлива в процессе выброса ОР СУЗ



*Рис.8.* Изменение аксиального офсета в процессе выброса ОР СУЗ



*Рис.9.* Изменение реактивности в процессе выброса ОР СУЗ



Рис.10. Относительное аксиальное распределение энерговыделения в ТВС №112 в стационарном состоянии



Рис.11. Относительное аксиальное распределение энерговыделения в ТВС №112 в момент 0,1 с

## Пространственные ксеноновые колебания

Вторая задача, рассматриваемая в рамках данной работы, была связана с верификацией кода ТРАП-КС для расчета пространственных колебаний ксенона. Актуальность такой задачи обусловлена хорошей представительностью подобных расчетов для демонстрации возможностей взаимосвязанных кодов с трехмерной нейтронной кинетикой. В процессе ксеноновых колебаний при взаимном влиянии нейтронно-физических и теплогидравлических параметров происходит постоянное перераспределение энерговыделения со значительным влиянием обратных связей.

Эксперименты по исследованию ксеноновых колебаний проводились на 1-м энергоблоке Ростовской АЭС первой топливной загрузки [6] – [7]. В одном из экспериментов [7] при выгорании 80 эффективных суток за счет ввода некоторого количества борной кислоты инициировалось снижение мощности за 20 минут от 100 % до 95 % номинального значения. В течение 4-х часов мощность медленно снижалась примерно до 50 % от начального уровня при неизменном положении ОР СУЗ и при отсутствии борного регулирования, затем мощность стабилизировалась и поддерживалась на постоянном уровне еще порядка 30 часов за счет работы регулятора подачи борной кислоты.

Основные параметры исходного состояния активной зоны при проведении расчетов были близки к указанным в таблице 1. Уровень остаточного тепловыделения и отравление активной зоны ксеноном соответствовало длительному времени работы реактора на исходной мощности, то есть концентрация ксенона в начальный момент времени была равновесной. Положение стержней регулирующей группы



Рис.12. Относительное аксиальное распределение энерговыделения в ТВС №126 в момент 0,1 с

СУЗ составляло 90% от низа активной зоны. Расчетное значение критической концентрации бора в исходном состоянии при расчете по коду ТРАП-КС составило 0.77 г/кг (по экспериментальным данным 0.79 г/кг). Значения температуры теплоносителя на входе в реактор задавались в соответствии с их изменением во время проведения эксперимента. Органы регулирования СУЗ в течение всего расчета оставались неподвижными, т.е. этап подавления ксеноновых колебаний оператором не моделировался.

Для воздействия на мощность активной зоны использовался пропорциональный «борный» регулятор, поддерживающий заданный закон изменения мощности реактора за счет изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе. «Борный» регулятор действовал в периоды начального снижения мощности активной зоны и ее стабилизации после четырехчасовой выдержки; в промежутке между этими периодами регулятор отключался, т.е. активная зона работала в режиме саморегулирования.

Для сопоставления результатов использовались данные эксперимента, а также аналогичные расчеты, проведенные по коду САПФИР\_95&RC [4], вошедшие в верификационные материалы для связки кодов КОРСАР/ГП-САПФИР\_95&RC. В качестве дополнительного материала для анализа были повторены расчеты указанного эксперимента по коду КОРСАР/ГП, но при работе борного регулятора в течение всего процесса. Это позволило оценить масштаб воздействия регулятора на точность расчета на этапе снижения мощности.



*Рис.13*. Изменение мощности реактора при инициировании ксеноновых колебаний за счет ввода борной кислоты

Полученные результаты представлены на рисунках 13-16. Сравнительный анализ результатов позволяет говорить о достаточно высокой точности моделирования рассматриваемого процесса. Код ТРАП-КС продемонстрировал хорошую согласованность с



*Рис. 14.* Изменение мощности реактора при инициировании ксеноновых колебаний за счет ввода борной кислоты (этап снижения мощности)



*Puc.15.* Изменение аксиального офсета при инициировании ксеноновых колебаний за счет ввода борной кислоты



*Рис.16.* Изменение концентрации бора при инициировании ксеноновых колебаний за счет ввода борной кислоты

результатами эксперимента и аттестованного кода САПФИР\_95&RC. Также было показано, что используемые в анализе программные коды корректно моделируют рассматриваемый процесс, поскольку оцененное влияние борного регулятора оказалось очень малым. Как показал расчет по коду КОРСАР/ГП, при наличии привязки к экспериментальным данным по мощности на этапе ее снижения (посредством работы регулятора), изменение борной кислоты не превышает 0,1% от реального значения на данном этапе.

В дополнение к задаче моделирования ксеноновых колебаний были проведены расчеты эксперимента с внесением возмущения за счет перемещения регулирующей группы ОР СУЗ, вошедшего в верификационные материалы кода САПФИР 95&RC [5]. Суть эксперимента состояла в возбуждении ксеноновых колебаний за счет изменения положения 10-й группы ОР СУЗ с 81,2 % до 60 % за 50 минут. Дальше осуществляется выдержка в течение примерно 4 часов, затем 10-я группа ОР СУЗ поднималась до 80 % за время 16 минут. Мощность реактора поддерживалась на уровне 72 % от номинальной, момент кампании составлял 30,1 эффективных суток, концентрация борной кислоты равнялась 5.19 г/кг. Поддержание постоянной мощности осуществлялось изменением входной концентрацией бора. На момент начала процесса принято стационарное отравление реактора.

Результаты расчета приведены на рисунках 17 и 18. Экспериментальные данные получены по двум системам. В первом случае (АСВРК) для определения офсета взяты распределения энерговыделения в ТВС, которые оснащены датчиками контроля энерговыделения. Во второй системе (ВМПО СВРК) используются результаты восстановления энерговыделения на все ТВС активной зоны. Результаты расчетов по коду ТРАП-КС во время переходного процесса в основном находятся между данными ВМПО СВРК (восстановленным) и АСВРК. Это говорит о точности модели кода и корректной работе численных алгоритмов, поскольку расчетные данные находятся в полосе погрешности эксперимента. Таким образом, полученные результаты подтверждают способность кода ТРАП-КС моделировать переходный процесс с возникновением ксеноновых колебаний с учетом всех значимых нейтронно-физических и тепло-гидравлических процессов.



*Рис.17.* Изменение положения групп ОР СУЗ при инициировании ксеноновых колебаний за счет перемещения органов регулирования





### Международная тестовая задача V1000CT-2

Дополнительно, следует сказать о расчетах, связанных с несимметричным вводом положительной реактивности при захолаживании теплоносителя первого контура. Типичным исходным событием для такого процесса является, например, разрыв паропровода. Международная тестовая задача V1000СТ-2 о гипотетическом разрыве паропровода на шестом энергоблоке АЭС Козлодуй с реакторной установкой типа ВВЭР-1000 имела несколько вариантов и представлялась на совещаниях рабочих групп AER-D и в открытой печати [8]. В настоящей работе используются результаты расчетов с граничными условиями на патрубках реактора при пессимистичном сценарии развития аварии. Граничные условия и исходные параметры задачи представлены в [9].



*Рис.19.* Результаты расчета различными кодами и граничные условия задачи V1000CT-2: *а) мощность реактора;* 

б) температура теплоносителя в холодных нитках петель (граничные условия); в) распределение энерговыделения между ТВС в момент достижения максимальной мощности реактора; г) распределение температуры теплоносителя на входе в ТВС в момент достижения максимальной мощности реактора.

Общее описание процесса таково. Разрыв паропровода парогенератора первой петли характеризуется глубоким расхолаживанием (порядка 80 градусов) аварийной петли главного контура циркуляции. Консервативно принимаются три допущения:

 неотключение главного циркуляционного насоса аварийной петли;

 застревание двух стержней защиты на периферии активной зоны со стороны аварийной петли в ТВС № 117 и 140;

вес аварийной защиты снижен до 3,5 %.

Последнее из указанных допущений приводит к тому, что в переходном процессе после срабатывания аварийной защиты наблюдается выход на повторную критичность из-за захолаживания теплоносителя. Развитие аварийного процесса проходит следующим образом. В результате срабатывания аварийной защиты, в начале процесса, мощность активной зоны резко падает. Вследствие снижения давления в парогенераторе, температура теплоносителя на входе в реактор из аварийной петли снижается. Вследствие обратной связи по плотности теплоносителя реактор выходит на повторную критичность, что приводит к последующему росту мощности до 40–60 % от номинального значения. Причем теплоноситель аварийной петли входит лишь в определенную область активной зоны, поскольку перемешивается в напорной камере реактора только частично. Эта область занимает примерно четверть активной зоны и расположена со стороны аварийной петли. Из-за обратных связей по плотности теплоносителя возникает большая неравномерность в распределении плотности потока нейтронов по объему активной зоны.

Поскольку аварийный парогенератор остается не отсеченным от разрыва, то вода из него полностью выпаривается (поступление питательной воды в парогенератор прекращается вследствие закрытия арматуры регуляторами). Теплоотвод от первого ко второму контуру в нем практически полностью прекращается, поэтому вода в аварийной петле постепенно нагревается. В итоге, на завершающей стадии процесса мощность реактора падает из-за положительного коэффициента реактивности по плотности теплоносителя (на входе в реактор повышается средняя температура теплоносителя, и, соответственно, снижается его плотность).

Результаты моделирования процесса различными кодами и граничные условия задачи представлены на рисунке 19. Главный вывод, который позволяет сделать анализ представленных результатов, состоит в хорошей согласованности кода ТРАП-КС с другими кодами. Это говорит об уровне точности использованных моделей и алгоритмов, позволяющем применять код ТРАП-КС для расчета подобных задач.

### Заключение

Приведен анализ некоторых расчетных задач из отчета по верификации программного комплекса ТРАП-КС, который является результатом модернизации комплекса ТРАП-97.

Верификация проводилась на основе сравнения расчетных результатов с результатами экспериментов на натурных блоках АЭС и результатами расчетов по альтернативным программным средствам.

В результате исследований показано, что с использованием кода ТРАП-КС с хорошей точностью рассчитываются основные параметры пространственного изменения поля энерговыделения в реакторе в условиях реактивностных аварий, несимметричной работы циркуляционных петель и нестационарного отравления при длительных переходных процессах.

По результатам верификации, область применения программного комплекса в версии ТРАП-КС распространена на расчет реактивностных аварий.

### Список литературы

1. Быков М.А., Зайцев С.И., Беляев Ю.В., Алехин Г.В., Егоров А.П., Гусев В.И. Совершенствование программно-расчётного комплекса ТРАП-97. Учёт пространственных эффектов в реакторе. // ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2006, №1, с. 48-52. 2. Программный комплекс КОРСАР/ГП.-Аттестационный паспорт №263 от 23.09.2009.

3. Artyomov G.V., Elshin A.V., Ivanov A.S. et al. Devepopment of neutron-physics models of varies types of reactors on the basis if unified algoritms of applied code package SAPFIR. // Proceedings of the 10-th International Seminar on Reactor Physics, Moscow, 2-6 September, 1997, p.34.

4. Программа САПФИР\_95&RC\_ВВЭР. - Аттестационный паспорт №205 от 15.12.2005.

5. Кавун О.Ю. Методика моделирования динамики энергоблока АЭС, реализованная в программном комплексе РАДУГА-ЭУ // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 5. с.17-39.

6. Артемов В.Г., Артемова Л.М., Иванов А.С., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П., Горохов А.К., Куракин К.Ю. Моделирование свободных ксеноновых колебаний в активной зоне реактора ВВЭР-1000 с использованием комплекса программ САПФИР\_95&RC. // Сборник трудов 4-й Международной научнотехнической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 2005.

7. Терешенок В.А., Степанов В.С., Поваров В.П., Лебедев О.В. Исследование поведения ВВЭР-1000 в переходном процессе, вызванном малым снижением мощности: Атомная энергия, т.93, 2002, вып. 4, с. 319-320.

8. Увакин М.А., Петкевич И.Г. Оценка неопределённости расчётных моделей путём разложения результирующей величины по входным параметрам // Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2010, № 2, с. 38–45.

9. Kolev N., Petrov N., Donov J., Angelova D., Aniel S., Royer E., Ivanov K., Dinkov Y., Popov D., Nikonov S. VVER-1000 Coolant Transient Benchmark PHASE MSLB Problem – Final Specifications, OECD Nuclear Energy Agency, 2006.

#### Контактная информация -

Увакин Максим Александрович, к.ф.м.н., ведущий инженер-конструктор, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», тел.: +7(4967)65-26-25, e-mail: uvakin ma@grpress.podolsk.ru

Статья поступила в редакцию 03.04.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 33 – 41.

## КОНСЕРВАТИВНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИСХОДНОГО СОБЫТИЯ ПРИ МАНЕВРЕННОМ РЕЖИМЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ ДЛЯ РАСЧЁТОВ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ НА РУ ВВЭР ПО КОДУ КОРСАР/ГП

### А.П. Демехин; М.А. Увакин, к.ф.м.н.; В.В. Брюхин; А.А. Устинов

(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

Одной из особенностей маневренных режимов является нестационарное изменение концентрации ксенона в активной зоне реактора. В результате при проведении расчетов аварий возникает задача определения наиболее неблагоприятного момента времени для возникновения исходного события. Предлагается методика, основанная на получении канонического разложения для параметров, соответствующих приемочным критериям. Базисом для разложения является вектор, компонентами которого являются регулирующие параметры. В результате, можно получить зависимость критериальных параметров как функции регулирующих параметров. В итоге определяется консервативное (наиболее неблагоприятное) исходное состояние и соответствующий ему момент времени, когда возникновение исходного события будет наиболее консервативно. Предлагаемая методика ориентирована на применение в связанных расчетах при выполнении вероятностных анализов безопасности (ВАБ).

**Ключевые слова:** маневренный режим, мощность, пространственные ксеноновые колебания, разрыв паропровода, каноническое разложение, критериальные параметры, ВАБ.

CONSERVATIVE METHODS FOR DETERMINATION OF TIME OF INITIAL EVENT OCCURRENCE AT MANEUVERING POWER MODES FOR CALCULATION OF ACCIDENT PROCESSES AT VVER RP AS PER CODE PACKAGE KORSAR/GP / A.P. DEMEKHIN; M.A. UVAKIN DSC (PH&M); V.V. BRUKHIN; A.N.USTINOV // One of the specific features of maneuvering power modes is transient xenon concentration variation in the core. Thus carrying out calculations of accidents, the problem arises on determination of the most unfavourable time moment of initiating event occurrence. The methods are proposed on the basis of canonical decomposition of acceptance criteria parameters. The decomposition basis is vector with regulation parameters in its components. As a result there are criteria parameters as functions of regulation parameters. The result of this procedure is time point for conservative initial event time appearance. Such methods are oriented to the coupled calculations during probabilistic safety analysis development.

*Key words:* cyclic load curve operation, power, reactivity emergency process, space xenon oscillations, main steam header break, canonical decomposition, criteria parameters, PSA.

### Введение

В настоящее время работа в маневренных режимах является обязательным требованием эксплуатирующих организаций к новым проектам РУ и АЭС. Поэтому проведение анализов безопасности РУ при работе в маневренном режиме является актуальной задачей. Особенностью данного режима работы РУ является изменение мощности, которое в свою очередь приводит к постоянному изменению других нейтронно-физических и теплогидравлических параметров в ходе процесса. При выполнении анализов безопасности РУ возникает задача выбора наиболее неблагоприятного момента времени для возникновения исходного события.

В представленной работе предлагается методика, позволяющая решить данную задачу и получить экстремальные значения критериальных параметров в аварийном режиме для всего промежутка времени, в течении которого проводится маневренный режим. Под критериальными параметрами подразумеваются параметры, для которых определены предельные значения, отвечающие выполнению приемочных критериев.

Суть данной методики заключается в получении канонического разложения для параметров, соответствующих приемочным критериям. Базисом для разложения является вектор, компонентами которого являются регулирующие параметры. Этот вектор характеризует состояние реактора в каждый момент маневрирования. Коэффициенты разложения вычисляются на основе нескольких проведенных расчетов рассматриваемого аварийного процесса, когда исходное событие возникает в различных точках графика изменения мощности.

В результате можно получить зависимость критериальных параметров как функции регулирующих параметров. Это позволяет аналитически решить задачу на поиск экстремума с учетом заданного пространства значений регулирующих параметров за период маневрирования. В итоге определяется наиболее неблагоприятное исходное состояние и соответствующий ему момент времени, когда возникновение исходного события будет наиболее консервативно. Поскольку расчет всех возможных состояний достаточно затруднителен, развитие данной методики представляется актуальной задачей.

Работа выполнялась исключительно с позиции проведения связанных нейтроннофизических и теплогидравлических расчетов. Аспекты динамических нагрузок, термомеханики твэл, прочности узлов оборудования при периодических изменениях мощности не рассматривались.

Направленность данной методики состоит в ее применении как одного из инструментов для определения минимальных сечений при проведении вероятностных анализов безопасности (ВАБ). Это обусловлено тем, что консервативный выбор моментов возникновения аварии в маневренном режиме может повлиять на критерии успеха, соответствующие выполнению функций безопасности.

### Расчётная модель

В качестве расчетного средства использовался код КОРСАР/ГП [1], аттестованный

в связке с кодом САПФИР [2] для взаимосвязанных расчетов РУ ВВЭР. Для проведения вычислений с вариациями исходных данных при помощи кода КОРСАР/ГП использовалась упрощенная модель [3], включающая в себя реактор с граничными условиями на входе и выходе активной зоны по давлению, расходу и температуре теплоносителя. Расчетная схема данной модели представляет собой составную часть полной контурной схемы, применяемой для расчетов переходных процессов на РУ ВВЭР по коду КОРСАР/ГП. Данная работа носит исследовательский характер и потребует большого количества вариантных расчётов. Поэтому такой подход к моделированию выбран с целью оптимизации расчетного времени.

Модель активной зоны представляет собой 163 теплогидравлических элемента «канал», разделённых на 20 расчётных элементов по высоте. Каждый элемент «канал» моделирует течение теплоносителя в отдельной ТВС. Элементы типа «канал» соединены с теплопроводящими элементами и модулем пространственной нейтронной кинетики. Между ними происходит обмен данными.

Граничные условия моделируются следующим образом. На входе к каждому каналу подключен элемент «источник массы», в котором определены удельная энтальпия (температура) и давление теплоносителя, соответствующие реальным величинам в установке. Выходы всех каналов расчетной модели подключены к элементу типа «граничная ячейка», где заданы граничные условия на выходе из активной зоны. Величины расхода и распределение температуры в ТВС определяются при проведении расчета стационарного состояния и соответствуют заданному перепаду давления при описании граничных условий. Расчетная схема приведена на рисунке 1.

### Моделирование маневренного режима

На первом этапе моделировался маневренный режим работы РУ по теплогидравлическому и нейтронно-физическому программному комплексу КОРСАР/ГП.

В ходе режима мощность реактора изменяется с периодичностью в одни сутки в достаточно широком диапазоне. Для обеспечения графика маневрирования



Рис.1. Упрощенная расчетная модель РУ

применяется регулирование, включающее положение групп ОР СУЗ, концентрацию борного поглотителя и температуру теплоносителя на входе в активную зону. При этом отсутствуют нарушения эксплуатационных пределов и ОР СУЗ находятся в регламентном положении.

Одной из особенностей маневренных режимов является нестационарное изменение концентрации ксенона в активной зоне реактора. Это изменение носит периодический характер, причем период колебания концентрации ксенона в общем случае не совпадает с периодом изменения мощности реактора. Таким образом, при работе РУ в маневренном режиме возможен очень широкий набор комбинаций регулирующих параметров.

При проведении режима суточного изменения мощности могут быть реализованы различные алгоритмы управления



*Рис.2.* Изменение положение групп ОР СУЗ от времени

энерговыделением активной зоны. В данной работе был рассмотрен режим регулирования 100 - 50 - 100 % N<sub>ном</sub>. Это означает уменьшение мощности со 100 % до 50 %, затем удержание мощности на данном уровне в течении заданного времени и возвращение мощности до номинального значения.

Согласно исходным нейтронно-физическим данным, работа РУ в суточном графике 100-50-100% N<sub>ном</sub> в конце кампании приводится на момент 400 эфф. сут. Рассмотрен суточный цикл маневрирования мощностью. Изменение мощности осуществляется за счет перемещения 8, 9 и 10 регулирующих групп ОР СУЗ и температурного регулирования. Борное регулирование в данном моменте кампании не участвует. Концентрация борной кислоты во всем суточном цикле изменения нагрузки составляла 0,7 г/кг H<sub>2</sub>O (0,122 г В/кг H<sub>2</sub>O).

В качестве исходных данных для данной работы были предоставлены результаты моделирования исследуемого маневренного режима по нейтронно-физическому программному комплексу САПФИР\_95&RC. Изменение регулирующих параметров в процессе маневрирования согласно этим данным отражено на рисунках 2 и 3. Изменение мощности и офсета представлено на рисунках 4 и 5. С использованием этих данных по коду КОРСАР/ГП было смоделировано аналогичное управление рабочими группами и температурой теплоносителя на входе в активную зону. Предполагалось совпадение изменения мощности и офсета, полученных по программным кодам САПФИР 95&RC и КОРСАР/ГП. Различия обусловлены могут быть несколькими факторами.

В САПФИР\_95&RC расчётная модель активной зоны по высоте разбита на 50 ячеек, в КОРСАР/ГП – на 20 ячеек, что скажется, в первую очередь, на таком значимом параметре, как концентрация ксенона.



*Рис.3.* Изменение температуры теплоносителя на входе в АЗ от времени



*Рис.4*. Изменение мощности и концентрации ксенона от времени

В коде КОРСАР/ГП в активной зоне проводится взаимосвязанный теплогидравлический и нейтронно-физический расчёт. В RC проводится нейтронно-физический расчёт с заданными теплогидравлическими параметрами. Разумеется, в длительном режиме это не окажет существенного влияния, но различие в теплогидравлических параметрах может воздействовать на спектр нейтронов, что также вызовет определенные различия в рассматриваемых моделях расчета. В варианте 1 по коду КОРСАР/ГП моделировался виток маневрирования со стационарным отравлением ксеноном на момент начала маневрирования, аналогично расчёту по САПФИР 95&RC. В варианте 2 было выбрано нестационарное отравлением ксеноном на момент начала маневрирования, при этом значение концентрации ксенона выбиралось с целью совпадения офсета в расчётах по КОРСАР/ГП и САПФИР 95&RC. Для обоих расчетных вариантов в процессе режима рассчитывалось нестационарное отравление с прямым расчетом концентраций ксенона и йода. Результаты изменения мощности и офсета в ходе маневренного режима приведены на рисунках 6 - 8. Для варианта 1 график мощности в достаточной степени адекватно повторят кривую, полученную по программе САПФИР 95&RC. График офсета качественно согласуется с графиком, полученным по САПФИР 95&RC, однако имеется количественное различие.

Из рисунков видно, что для варианта 2 график изменения офсета лучше согласуется с результатами, полученными по программному комплексу САПФИР\_95&RC, чем в варианте 1. Однако график мощности не является удовлетворительным. На участке снижения мощности она опускается значительно ниже 50 % N<sub>ном</sub> и продолжает снижаться на участке поддержания данного уровня. При подъёме мощности не достигается начальный уровень - 100 % N<sub>ном</sub>.



Рис. 5. Изменение офсета от времени



Рис.6. Изменение мощности от времени 1 - стационарное отравление ксеноном на момент начала маневрирования 2 - нестационарное отравление ксеноном на момент начала маневрирования 3 - RC

В результате, для проведения дальнейших исследований в качестве основного варианта по коду КОРСАР/ГП рассматривался вариант 1.

### Моделирование аварийного режима

Как было сказано выше, целью работы является определение экстремального значения критериального параметра в аварийном режиме для всего промежутка времени, в течении которого проводится маневренный режим. Для этого предлагается методика, основанная на каноническом разложении критериального параметра по базисному вектору исходных данных. Для определения коэффициентов разложения необходимо проведение нескольких расчётов аварийного режима. Затем по результатам расчётов будет построена функция зависимости исследуемого критериального



Рис.7. Изменение офсета от времени 1 - стационарное отравление ксеноном на момент начала маневрирования 2 - нестационарное отравление ксеноном на момент начала маневрирования 3 - RC

параметра от регулирующих. Остаётся вопрос выбора аварийного режима.

Наиболее простым с точки зрения моделирования является аварийный режим с вводом положительной реактивности без значительного влияния на теплогидравлические параметры. В таком случае характеристики теплоносителя, поступающего в активную зону, не будут меняться и поэтому их можно оставить такими, какими они были на момент начала аварийного режима. В качестве такого режима подходит выброс стержня ОР СУЗ. Однако у данного исходного события есть один «минус». В ходе маневренного режима мощность поддерживается на заданном уровне за счёт движения регулирующих групп. В то время как остальные группы находятся в верхнем положении. Выбрасываемый стержень должен находиться в одной из регулирующих групп, чтобы не оказаться в верхнем положении до исходного события. Т.к. регулирующие группы находятся в постоянном движении, то в различные моменты времени выброс ОР СУЗ будет происходить с разной высоты. Таким образом, в различных расчётах аварийного режима будет вводиться различная реактивность, что приведёт к искажению связи между регулирующими параметрами и критериальными.

Поэтому в качестве исходного события был выбран разрыв главного парового коллектора (ГПК), при котором вводимая положительная реактивность не зависит от положения pery-



лирующих групп. При разрыве ГПК происходит захолаживание теплоносителя, поступающего в активную зону. Для моделирования данного процесса были использованы данные об изменении температуры теплоносителя на входе в активную зону от времени в течении всего аварийного процесса. Эти данные получены в результате проведения расчётов данного режима с использованием нодализационной схемы, в которой смоделированы первый и второй контур РУ.

Как отмечалось ранее, в качестве исходного состояния в расчёте был выбран конец стационарной загрузки, что является консервативным для данного режима. Это объясняется тем, что коэффициент реактивности по температуре теплоносителя в конце кампании максимальный по модулю, что приводит к наибольшему росту мощности при захолаживании теплоносителя первого контура.

Следующей задачей являлся выбор сценария аварийного режима. Работа систем защиты и срабатывание уставок должны быть подобраны таким образом, чтобы для любых вариантов с различным моментом времени возникновения исходного события сценарий аварии был аналогичным. Это является необходимым условием для обеспечения гладкости и неразрывности функции зависимости критериального параметра от исходных базовых. Причина в том, что различные сценарии аварийного процесса потребуют, разумеется, различных разложений для того или иного критериального параметра. Поскольку в рамках данной работы была поставлена задача исследования принципиальных возможностей предложенного подхода, то было принято решение, ограничиться аварийным процессом, проходящим по одному сценарию на всем этапе маневрирования. При развитии предложенного подхода этот фактор будет необходимо учитывать.

Для аварийного режима выбран следующий сценарий. Моделируется разрыв ГПК подачей на вход активной зоны захоложенного теплоносителя. Понижение температуры теплоносителя приводит к вводу положительной реактивности и повышению мощности с последующим срабатыванием АЗ. В данной упрощённой расчётной схеме кроме аварийной системы больше никаких систем защиты не моделируется. Это существенно упрощает анализ результатов и позволяет избавиться от искажений, вносимых различными уставками.

Проведены несколько расчётов аварийного режима с разрывом ГПК для различных моментов времени. В качестве критериального параметра была выбрана максимальная температура топлива. На рисунке 9 представлено изменение максимальной температуры топлива в течение аварийного режима для одного из рассмотренных вариантов. В таблицах 1 и 2 представлены значения регулирующих параметров и максимальной температуры топлива для проведённых расчётов.

### Выбор наихудшего исходного состояния

Получены результаты расчёта аварийного режима с разрывом ГПК для 9 вариантов. По имеющимся данным необходимо определить наиболее неблагоприятный момент для возникновения исходного события.



*Рис.9.* График изменения максимальной температуры топлива от времени в аварийном режиме

Для выбора наиболее консервативного исходного состояния на основе предварительных результатов нескольких расчетов предлагается методика, основанная на получении канонического разложения для параметров, соответствующих приемочным критериям. Такой подход апробирован на ряде оптимизационных задач в области физики реакторов и дает хорошие результаты [4]. В рассматриваемом случае базисом для разложения является вектор x, в качестве компонентов которого были предложены регулирующие параметры, т.е.  $\bar{x} = \{H_{s}, H_{9}, H_{10}, T_{mp}, \rho_{Xv}\}$ , где  $H_{s}, H_{g}, H_{10}$  - по-ложение 8-й, 9-й и 10-й регулирующих групп (в сантиметрах от низа активной зоны) соответственно, Т<sub>іпр</sub>- входная температура теплоносителя (в градусах Цельсия),  $\rho_{xe}$ - средняя концентрация ксенона-135 в активной зоне (в относительных единицах по отношению к равновесной концентрации на 100 % мощности). Первоначально предполагалось использовать в качестве базиса только регулируюпараметры групп шие (положение И температуру на входе в активную зону). Однако предварительный анализ показал, что для некоторых этапов маневрирования эти параметры полностью совпадают. Поэтому в базисный набор была включена концентрация ксенона, что также позволило задействовать в модели этот важный параметр.

Ранее упоминалось, что в данной работе борное регулирование не использовалось. Однако бор тоже может использоваться как один из регуляторов. В таком случае в регулирующие параметры стоит добавить среднюю концентрацию борной кислоты в активной зоне. В основном это потребуется при использовании данного подхода для анализа аварий на различных этапах кампании.

В первом приближении будем считать, что выбранные компоненты вектора  $\vec{x}$  однозначно характеризуют исходное состояние активной зоны за период суточного маневра мощности. Исследуемый параметр из набора приемочных критериев обозначим как функцию от базисного вектора  $f(\vec{x})$ . Каноническое разложение для  $f(\vec{x})$  ищется в виде (1), где  $C_i$ - коэффициенты разложения.

$$f(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{32} C_i \cdot H_8^m \cdot H_9^m \cdot H_{10}^p \cdot T_{inp}^q \cdot \rho_{Xe}^r, \quad m, n, p, q, r \in \{0, 1\}$$
(1)

Значения показателей степени переменных выбирались из 0 и 1, что позволило получить многокомпонентную зависимость искомой величины от выбранных базовых параметров (в разложении присутствуют все возможные перекрестные произведения). Таким образом, общее количество членов ряда (1) составило 32, а максимальная степень полинома равна 5. Для предварительного анализа такое количество представляется достаточным.

В итоге, произведя расчет аварии из нескольких начальных точек, можно по ним определить коэффициенты разложения многочлена (1) и получить в явном виде зависимость исследуемого критериального параметра как функции базисных переменных. Это позволяет аналитически решить задачу на поиск экстремума с учетом заданного пространства значений базисных (регулирующих) параметров за период маневрирования. В результате определяется наиболее неблагоприятное исходное состояние и соответствующий ему момент времени, когда возникновение исходного события будет наиболее консервативно.

Для иллюстрации методики была выбрана задача с разрывом главного парового коллектора. Исходное событие моделируется граничными условиями (симметричное захолаживание теплоносителя) на входе в активную зону. Используется описанная в п. 2 нодализационная схема, горячие каналы не моделировались. В результате происходит рост мощности, приводящий к срабатыванию АЗ. Сценарий аварии, уставки на АЗ и граничные условия были выбраны из реального расчета по полноконтурной схеме. В качестве приемочного критерия рассматривалась максимальная температура топлива  $T_{f \max}$ . Набор расчетных точек, выбранный для получения многочлена (1) приведен в таблице 1.

Для нахождения разложения (1) был разработан численный алгоритм и выполнена его программная реализация. Поиск коэффициентов разложения проводился по методу наименьших квадратов. Задача определения минимума на каждой итерации решалась методом покоординатного спуска [5]. Проверка многочлена (1) проводилась по набору расчетных точек, представленному в таблице 2. Данные таблиц 1 и 2 показывают приемлемую точность полученного разложения по части максимальной определения температуры топлива. Анализ данных таблиц 1 и 2 показывает, что численный метод поиска разложения позволяет получить практически полное совпадение значений многочлена в выбранных для поиска коэффициентов точках. В точках, выбранных для проверки, значения максимальной температуры топлива, полученные

Таблица 1

Н <sub>10</sub> , см	<i>H</i> <sub>9</sub> , см	Н <sub>8</sub> , см	T <sub>inp</sub> , °C	ρ <sub>хе</sub> , отн.ед.	T <sub>fmax</sub> , °С расчет КОРСАР	<i>T<sub>f max</sub></i> , °С разложение в ряд
320,25	375,00	375,00	569,47	1,00	1631,8	1631,8
75,00	92,61	205,11	567,59	1,04	1293,0	1293,0
75,00	125,21	237,71	567,27	1,09	1289,2	1289,1
115,88	144,75	273,00	564,06	1,24	1443,7	1443,7
357,00	375,00	375,00	565,13	1,21	1572,5	1572,5
357,00	375,00	375,00	568,64	1,07	1587,1	1587,0

Набор расчетных точек для вычисления коэффициентов разложения

Таблица 2

### Набор расчетных точек для проверки полученного многочлена

Н <sub>10</sub> , см	<i>Н</i> <sub>9</sub> , см	Н <sub>8</sub> , см	$T_{inp}$ , °C	ρ <sub>хе</sub> , отн.ед.	<i>T<sub>fmax</sub></i> , °С расчет КОРСАР	<i>T<sub>f max</sub></i> , °С разложение в ряд
75,00	75,38	187,88	567,73	1,02	1366,1	1300,9
357,00	375,00	375,00	567,19	1,22	1544,3	1544,6
357,00	375,00	375,00	567,00	1,11	1626,6	1590,0

при расчете по коду КОРСАР/ГП, ожидаемо расходятся с полиномом в интервале порядка 0-50 °С. Это связано с выбором конкретных точек для поиска разложения и точек для проверки. Процедура выбора полинома имеет широкие возможности для поиска наилучших коэффициентов разложения, отвечающих, например, наименьшей средней погрешности по всем точкам.

Расчет при помощи полинома (1) для всего массива исходных точек на весь период суточного маневрирования проиллюстрирован на рисунке 10. Полученный результат позволяет оценить, насколько возможны различия в максимальной температуре топлива при возникновении аварии с разрывом ГПК на различных этапах маневрирования. Особенно значимым представляется факт различной максимальной температуры топлива для исходных точек, соответствующей равной мощности. Именно это и отличает аварийную ситуацию в маневренном режиме от аварии в обычном стационарном состоянии.

Необходимо уточнить, что определение значения критериального параметра по полученному каноническому разложению применимо только для данного аварийного режима и для данного сценария протекания аварии и работы систем защиты. Также стоит отметить, что в данной работе режимы управления ОР СУЗ и изменения температуры теплоносителя на входе в активную зону были выбраны в качестве исходных данных и не обязательно являются консервативными. Для поиска консервативного режима необходимо было бы рассмотреть суточное маневрирование мощностью с различными способами управления ОР СУЗ и температурой на входе в активную зону. Затем для каждого варианта целесообразно получить разложение критериального параметра в степенной ряд и получить наихудшее состояние аналогично, как было предложено выше (рисунок 10). Такой анализ потребует серии многовариантных расчётов. Поэтому при решении задачи такого рода предложенный метод поиска консервативного состояния, с точки зрения оптимизации временного фактора, будет очень полезен.

### Заключение

Проведено моделирование маневренного режима с суточным графиком нагрузки мощности. В ходе работы проверена согласованность результатов, полученных по взаимосвязанному расчётному по коду с трёхмерной нейтронной кинетикой КОРСАР/ГП и диффузионному нейтронно-физическому коду САПФИР\_95&RC, при заданных теплогидравлических параметрах в активной зоне.

В результате проведенных исследований было также показано, что предлагаемая методика, основанная на поиске канонических разложений критериальных параметров, требует развития для её дальнейшего применения в анализах безопасности РУ. При помощи предлагаемого подхода возможно быстро оценить изменение приемочных критериев в аварийном процессе в зависимости от исходного состояния. Методика имеет широкие возможности для расширения области применения и вовлечения в себя дополнительных алгоритмов и может использоваться как элемент анализа чувствительности при проведении взаимосвязанных расчетов.



 Программный комплекс КОРСАР/ГП.-Аттестационный паспорт №263 от 23.09.2009.

2. Программа САПФИР\_95&RC\_ВВЭР.-Аттестационный паспорт №205 от 15.12.2005.

3. Петкевич И.Г., Алёхин Г.В., Результаты расчёта международной тестовой задачи V1000СТ-2 с разрывом паропровода парогенератора на реакторной установке ВВЭР-1000 с помощью программного комплекса КОРСАР/ГП, - Молодёжь ЯТЦ: наука, производство, экологическая безопасность, Северск, 2010.



*Рис.10*. Оценка максимальной температуры топлива при помощи полученного разложения

4. Соловьев Д.А., Семенов А.А., Блок оптимизации борного регулирования для снижения накопления жидких радиоактивных отходов в переходных режимах ВВЭР-1000 // МНТК-2006, ВНИИАЭС, Москва, 2006. 5. Калиткин Н.Н. Численные методы. // Наука, ФМЛ, Москва, 1978.

Контактная информация -

Демехин Антон Павлович, инженер-конструктор 3 категории, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», тел.: +7(985)141-93-87, e-mail:peneutron@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.04.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 42 – 50

## ОБОБЩЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ DDL-CXEM GQ-МЕТОДА НА ТРЕХМЕРНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СЕТКИ ИЗ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ГЕКСАЭДРОВ

### А.А. Николаев

(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

Разработаны и протестированы DDL-схемы GQ3D-метода для аппроксимации оператора переноса излучения на произвольных гексаэдрических сетках.

Ключевые слова: DDL-схемы, DS\_-метод, реактор, трехмерные неструктурированные сетки.

**GENERALIZATION OF TWO-DIMENSIONAL DDL-SCHEMES OF GQ-METHOD FOR THREE-DIMENSIONAL ARBITRARY HEXAHEDRAL SPATIAL MESH / A.A. NIKOLAEV //** The DDL-schemes of GQ3D-method for aproximation of  $DS_n$  transport equation in 3D Cartesian geometry for unstructured hexahedral mesh is developed and tested.

Key words: DDL-schemes, DS<sub>1</sub> transport equation, reactor, 3D unstructured mesh.

### Введение

В 1982 Хиллом Г. В [1] T.P. И P.P. Патерностером были предложены DDL-соотношения (diamond difference like) для аппроксимации оператора переноса в двумерной геометрии на сетках, составленных из произвольных четырехугольных (и треугольных) ячеек. Применение произвольных четырехугольников позволяет намного более аккуратно аппроксимировать сложные модели в двумерной геометрии (рисунок 1), чем это позволяет применение прямоугольных ячеек. DDL-схемы [1] впоследствии были реализованы в программах LaMEDOC и TWODANT-GQ <sup>1</sup> [1-4].

Двумерные DDL-схемы GQ-метода наследуют все качества классических алмазных разностных схем – простоту, универсальность, относительно высокую точность, возможность обобщения на случай трехмерной геометрии [6]. Последнее обстоятельство было использовано при разработке программы PMSNSYS [7,8] решения многогруппового стационарного уравнения переноса для пространственных сеток, составленных из прямых призм с произвольным четырехугольным основанием. В этом случае для аппроксимации решения в плоском сечении призм использованы DDL-схемы GQ-метода, а для связи входящего и выходящего излучения на торцевых гранях использована DD-схема.

Методическим недостатком DDL-схем GQметода, в отличие от классических DD-схем, является некоторая зависимость точности решения от степени «искаженности» расчетных ячеек. Однако, как показывает практика



Рис.1. Пример сетки

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> В работе [5] численные схемы [1] названы схемами GQметода (generalized quadrilateral)

использования программы PMSNSYS [9-12] в расчетном обосновании нейтронно-физических характеристик активных зон реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем, такая погрешность при разумном построении сеточных моделей оказывается существенно меньше эффектов пространственной гетерогенности, учет которых можно осуществлять с использованием DDL-схем и неструктурированной сетки из прямых призм. При прямоугольной или ромбической форме двумерных ячеек DDL- и DD-схемы полностью эквивалентны.

Очевидно, что подход, использованный в [1] при разработке DDL-схем для решения уравнения переноса на двумерных пространственных сетках, составленных из произвольных четырехугольников, может быть положен в основу разработки DDL-схем, предназначенных для аппроксимации решения на трехмерных сетках, составленных произвольных выпуклых гексаэдров. ИЗ Решение уравнения переноса DS<sub>"</sub>-методом на пространственных сетках из произвольных гексаэдров или тетраэдров с использованием LD-схемы 3-го порядка точности реализовано в программе Attila [13]. Еще более интересное в практическом плане решение реализовано в программе РадугаТ [14] для произвольных тетраэдральных сеток – балансная и численно устойчивая LM-схема 4-го порядка точности (а также схема 2-го порядка точности с плоским представлением источника).

Как отмечено в [15] и как это следует из сложившейся практики расчетного обоснования, применение разностных схем 2-го порядка точности, как правило, более оправдано для практических расчетов активных зон, а схемы более высокого порядка предпочтительны для решения сложных задач расчетов защиты от ионизирующих излучений. DDL-схемы Т.Р. Хилла и Р.Р. Патерностера имеют 2-й порядок точности, и построение разностных схем на их основе для гексаэдрических сеток может иметь хорошие перспективы для применения в расчетах активных зон и в определении условий работы элементов конструкций реакторов, расположенных вблизи активной зоны.

### Формулы DDL-схем GQ3D-метода

Соответствующие численные DDL-схемы для произвольных гексаэдров, представленные



*Рис.2.* Гексаэдрическая ячейка с принятой в работе нумерацией граней (номера видимых граней выделены полужирным и имеют больший размер шрифта)

ниже, по аналогии с [5] будем для определенности называть DDL-схемами GQ3D-метода. Рассмотрим гексаэдр на рисунке 2. В соответствии с рисунком допустим, что грань 1 противолежит грани 6, грань 2 противолежит грани 4, грань 3 противолежит грани 5.

Для данного гексаэдра (вообще говоря, любого произвольного гексаэдра) возможны следующие варианты «освещенности» падающим излучением с направлением Ω<sub>m</sub>:

 освещены три грани, имеющие противолежащие им неосвещенные грани;

 освещены две грани, имеющие противолежащие им неосвещенные грани, при этом две оставшиеся противолежащие грани не освещены;

 освещены две грани, имеющие противолежащие им неосвещенные грани, при этом две оставшиеся противолежащие грани освещены;

 освещена одна грань, имеющая неосвещенную противолежащую ей грань, при этом все остальные грани не освещены;

 освещена одна грань, имеющая неосвещенную противолежащую ей грань, при этом из остальных граней две противолежащие освещены и две другие противолежащие не освещены;

 освещена одна грань, имеющая неосвещенную противолежащую ей грань, при этом все остальные грани освещены.

Обобщение DDL-схем GQ-метода на шесть рассмотренных случаев освещенности приводит к следующим DDL-схемам GQ3D-метода:

1) 
$$\Psi_6 = 2\Psi_0 - \Psi_1$$
,  $\Psi_4 = 2\Psi_0 - \Psi_2$ ,  $\Psi_5 = 2\Psi_0 - \Psi_3$ ;  
2)  $\Psi_6 = 2\Psi_0 - \Psi_1$ ,  $\Psi_4 = 2\Psi_0 - \Psi_2$ ,  $\Psi_5 = \Psi_3 = \Psi_0$ ;  
3)  $\Psi_6 = 2\Psi_0 - \Psi_1$ ,  $\Psi_4 = 4\Psi_0 - \Psi_2 - \Psi_3 - \Psi_5$ ;

4) 
$$\Psi_6 = 2\Psi_0 - \Psi_1, \Psi_2 = \Psi_3 = \Psi_4 = \Psi_5 = \Psi_0;$$
  
5)  $\Psi_6 = 2\Psi_0 - \Psi_1, \Psi_5 = \Psi_3 = (4\Psi_0 - \Psi_2 - \Psi_4)/2;$   
6)  $\Psi_6 = 6\Psi_0 - \Psi_1 - \Psi_2 - \Psi_3 - \Psi_4 - \Psi_5.$ 

Эти численные схемы вместе с соотношением баланса нулевого порядка [6] в гексаэдрической ячейке для направления полета  $\Omega_m$  с освещенными (*i*) и неосвещенными (*j*) гранями

$$\sum_{i} A_{i} \Psi_{i} + \sum_{j} A_{j} \Psi_{j} + \Sigma_{i} \Psi_{0} V = VS,$$

где  $A_i$  означает площадь проекции освещенной грани *i* на плоскость, перпендикулярную вектору направления распространения излучения  $\Omega_m$  (аналогично для неосвещенных граней с индексом *j*);

 $\Psi_0$  – средний в ячейке угловой поток, нейтр./(см<sup>2</sup>·с·стер.);

 $\Psi_i$  – угловой поток на *i*-й освещенной грани гексаэдра, нейтр./(см<sup>2</sup>·с·стер.);

 $\Psi_j$  – угловой поток на *j*-й неосвещенной грани гексаэдра, нейтр./(см<sup>2</sup>·с·стер.);

 $\Sigma_{t}$  – полное сечение, см<sup>-1</sup>;

V – объем ячейки, см<sup>3</sup>;

S – источник нейтронов, нейтр./(см<sup>3</sup>·с),

образуют замкнутую систему уравнений, которая легко разрешается относительно выходящего излучения на неосвещенных гранях гексаэдра.

## Реализация DDL-схем GQ3D-метода в программе PMSNSYS

Рассмотренные выше формулы DDLсхемы GQ3D-метода реализованы в программе PMSNSYS в виде дополнительной геометрической опции, при этом предусмотрена «нулевая» коррекция отрицательных потоков (set-to-zero fixup). Внедрение разработанных численных схем в программу PMSNSYS не потребовало изменения архитектуры программы, при этом было выполнено распараллеливание расчета на гексаэдрических сетках по направлениям угловой квадратуры (аналогично [12]).

Вместе с тем, внедрение гексаэдрических сеток в PMSNSYS потребовало доработки используемой в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» пре- и постпроцессинговой программы REBEL [16] для решения задач создания сеток из произвольных гексаэдров и работы с ними. Предварительное тестирование DDL-схем GQ3D-метода на множестве отладочных задач и сравнение с результатами, полученными на классических регулярных сетках, подтвердило корректность конечно-разностных уравнений GQ3D-метода и их программной реализации. Далее представлены результаты их применения для расчета бенчмарк-задачи № 2 Т. Такеды из сборника [17].

### Расчет бенчмарк-задачи

Бенчмарк-задача № 2 из сборника [17] представляет собой модель реактора на быстрых нейтронах малых размеров с жидкометаллическим теплоносителем (рисунок 3). Для данной задачи выполнены расчеты К<sub>эфф</sub>, эффективности стержней и 4-х групповой плотности потока нейтронов. Эталонное решение в значении К<sub>эфф</sub> и эффективности поглощающих стержней, полученное по методу Монте-Карло, взято из [11], эталонные значения групповых потоков – из [17].

Для выполнения расчетов подготовлены следующие сеточные модели:

 сетка № 1 (обозначение «DD»), прямоугольная с размером ячеек 5 см (рисунок 4 а);

– сетка № 2 (обозначение «GQ-Z»), из прямых призм с произвольным многоугольным основанием, полученная из сетки № 1 путем перемещения Х- и У-координат вершин ячеек на случайную величину в диапазоне от 0 до 1,5 см (рисунок 4 б). При деформации сетки № 1 объем и внешняя форма областей реактора были сохранены;

 сетка № 3 (обозначение «GQ3D»), полученная из сетки № 2 путем смещения Z-координат вершин ячеек путем их проецирования



*Рис. 3.* Модель бенчмарк-задачи в REBEL (фрагмент)



Рис. 4. Расчетные сеточные модели, горизонтальное сечение через центр активной зоны a – «DD», б – сетка «GQ-Z» и «GQ3D», в – сетка «GQ3D x2», фрагмент



Рис. 5. Форма гексаэдров для сеток «GQ3D» и «GQ3D\_2» на боковых сторонах модели а, б, в, г – вид сетки в направлении взгляда вдоль осей X+, X-,Y+,Y-, соответственно

на плоскости, не параллельные плоскости Х-Ү (рисунки 4 б, 5). При деформации сетки № 2 объем и внешняя форма областей реактора были сохранены;



а



Рис. 6. Отличие пространственного распределения плотности полного потока для сетки «GQ3D\_x2», % (показаны ячейки, отличие в которых не превышает 1 %)  $a - omличие S_4 om S_{32} dля 25° (89,4 % ячеек),$  $\delta - omличие 0° om 25° при S_8 (93,3 % ячеек)$ 

– сетка № 4 (обозначение «GQ3D\_x2»), полученная из сетки № 2 путем половинного дробления ячеек в плоскости Х-У с последующим смещением Z-координат вершин ячеек путем их проецирования на плоскости, не параллельные плоскости Х-У (рисунки 4 в, 5). При деформации сетки № 2 объем и внешняя форма областей реактора были сохранены.

Следует особо отметить, что созданные искаженные сетки («GQ-Z», «GQ3D», «GQ3D\_x2») не являются гладкими, т.к. искажение ячеек достаточно существенное. Расчеты также выполнены для трех сеток типа «GQ3D» и «GQ3D\_x2», которые были

### К<sub>эфф</sub> и эффективность поглощающих стержней в сравнении с эталонным решением, полученным в [11] А.Н. Скобелевым по программе TDMCC [18]

Панамата	<b>A</b>		S <sub>n</sub>				
параметр	Аппроксимация	S4	S <sub>8</sub>	S <sub>16</sub>	S <sub>32</sub>		
	Эталон (Монте-Карло)	$0,9736 \pm 0,0000$					
	«DD»	0,9734	0,9734	0,9734	0,9734		
	«GQ-Z»	0,9731	0,9726	0,9725	0,9725		
к <sub>эфф</sub> при извлеченных стержнях	«GQ3D», 0°	0,9730	0,9726	0,9725	0,9725		
	«GQ3D», 10°	0,9727	0,9724	0,9724	0,9725		
	«GQ3D», 25°	0,9721	0,9726	0,9725	0,9725		
	Эталон (Монте-Карло)		0,9596 =	± 0,0000			
	«DD»	0,9592	0,9592	0,9593	0,9593		
	«GQ-Z»	0,9589	0,9584	0,9583	0,9583		
	«GQ3D», 0°	0,9588	0,9584	0,9582	0,9582		
К <sub>эфф</sub> при погруженных стержнях	«GQ3D», 10°	0,9585	0,9582	0,9582	0,9582		
	«GQ3D», 25°	0,9579	0,9583	0,9582	0,9582		
	«GQ3D_x2», 0°	0,9594	0,9594	0,9594	0,9594		
	«GQ3D_x2», 10°	0,9594	0,9594	0,9594	0,9594		
	«GQ3D_x2», 25°	0,9594	0,9594	0,9594	0,9594		
	Эталон (Монте-Карло)		0,0140	$\pm 0,000$			
	«DD»	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142		
	«GQ-Z»	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142		
Эффективность стержней, % Дк	«GQ3D», 0°	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142		
	«GQ3D», 10°	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142		
	«GQ3D», 25°	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142		

повернуты из исходного положения на  $0^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$  и  $25^{\circ}$  одновременно вокруг трех координатных осей.

Результаты расчетов  $K_{_{3\phi\phi}}$  и эффективности стержней представлены в таблице 1, групповых потоков – в таблице 2 (в расчетах используются  $\mathrm{ES}_n$ -квадратуры Карлсона). Все результаты расчетов, кроме результатов, представленных на рисунке 6, получены с использованием коррекции отрицательных потоков.

Как видно из таблицы 1, получаемое по GQ3D-схеме решение стабильно относительно эффективности стержней, а расчетное значение К<sub>эфф</sub> находится в слабой зависимости от искажения ячеек и поворота сетки. Поворот сетки «GQ3D» вокруг координатных осей уменьшает долю сферически-симметричных ячеек, что обусловливает большее отличие от результатов, полученных на регулярной

квадратной сетке. Полученные результаты также показывают, что методическая погрешность GQ3D-метода, связанная с искажением ячеек, уменьшается по мере измельчения размера ячеек (ср. результаты сеток «GQ3D» и «GQ3D\_x2»).

Представленные в таблице 2 плотности групповых потоков отличаются от эталонного решения, полученного по методу Монте-Карло, в активной зоне существенно менее одного процента, в других областях реактора преимущественно не более чем на 1,5 %.

На рисунке 6 представлено сравнение пространственного распределения плотности групповых потоков во всем объеме расчетной модели (при погруженных поглощающих стержнях), рассчитанного для «GQ3D\_x2» сетки при различных значениях порядка угловой квадратуры и углов поворота сетки.

		Область реактора						
Наименование сетки	S <sub>n</sub>	Активная зона	Радиальный бланкет	Аксиальный бланкет	Поглощающие стержни			
		0,0	-0,6	-1,0	-1,3			
«GQ-Z»	C	0,0	-0,9	-0,1	-1,0			
	$\mathbf{S}_4$	0,0	-0,5	0,4	-0,6			
		0,2	0,2	5,6	-0,1			
		0,0	-1,1	-0,7	-1,2			
	S	0,0	-1,3	-0,2	-1,2			
	<b>3</b> <sub>32</sub>	0,1	-0,7	0,4	-0,6			
		0,3	0,0	5,7	-0,2			
		0,0	-0,6	-1,0	-1,5			
	ç	0,0	-1,0	-0,1	-1,2			
	$\mathbf{S}_4$	0,0	-0,5	0,4	-0,6			
"CO3D» 0°		0,2	0,2	5,6	-0,1			
«UQ3D», 0	S <sub>32</sub>	0,0	-1,0	-0,8	-1,3			
		-0,1	-1,2	-0,1	-1,3			
		0,0	-0,9	0,4	-0,7			
		0,2	0,1	5,7	-0,3			
		0,0	-1,2	-0,8	-1,5			
	ç	0,0	-1,6	-0,3	-1,3			
	<b>3</b> <sub>4</sub>	0,1	-1,0	0,3	-0,7			
//GO3D» 25°		0,3	-0,2	5,6	-0,1			
«UQ3D», 23		0,0	-1,1	-0,8	-1,3			
	c	0,0	-1,4	-0,2	-1,3			
	3 <sub>32</sub>	0,1	-0,8	0,4	-0,7			
		0,3	0,0	5,7	-0,2			
		0,1	-0,3	0,2	-1,4			
	ç	0,0	-0,5	0,3	-1,3			
	$\mathbf{S}_4$	0,0	-0,3	0,6	-0,8			
		0,2	0,2	5,0	-0,3			
«JU23D_X2», 23		0,1	-0,2	0,0	-1,3			
	S	0,0	-0,4	0,3	-1,4			
	<b>S</b> <sub>32</sub>	0,0	-0,1	0,5	-0,9			
		0.2	0.3	5.0	-0.3			

## Отличие плотности групповых потоков от эталонного результата [17] при погруженных стержнях, %

### Заключение

В настоящей работе выполнено обобщение двумерных схем [1] на трехмерный случай пространственных сеток из произвольных выпуклых гексаэдров. Разработанные численные DDL-схемы реализованы в программе PMSNSYS. Выполнено предварительное тестирование схем, результаты которого показывают, что решение типовых задач расчета активных зон реакторов на быстрых нейтронах с использованием разработанных DDL-схем выполняется с хорошей точностью. На практике разработанные схемы могут обеспечивать определенные преимущества по сравнению с классическими трехмерными сетками (X-Y-Z, R-Θ-Z, HEX-Z) в части более экономной и аккуратной сеточной аппроксимации при описании областей реактора со сложной геометрической структурой.

### Список литературы

1. Hill T.R., Pathernoster R.R. Twodimensional spatial discretization methods on a Langrangian mesh // Presented at Mtg. on Deterministic Transport Methods, Bruyere-Le-Chatel, France, April 27-30, 1982.

2. DANTSYS 3.0: One-,Two-, and Three-Dimensional, Multigroup, Discrete-Ordinate Transport Code System / R.E. Alcouffe, R.A. Baker, F.W. Brinkley, D.R. Mar, R.D. O'Dell, W.F. Walters // LA-12969-M. – Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA, 1995.

3. Alcouffe R.E. «A Diffusion-Accelerated Sn Transport Method for Radiation Transport on a General Quadrilateral Mesh,» Nucl. Sci. Eng., 1990, v 105, p. 191-197.

4. Alcouffe R.E. Los Alamos neutral particle transport codes: new and enhanced capabilities / Alcouffe R. E., Baker R. S., Brinkley E W., et al.// Presented at seminar «Deterministic methods in radiation transport». – Oak Ridge, Tennessee, – February 4-5, 1992, c. 117-130.

5. DeHart M.D. «A Discrete Ordinates Approximation to the Neutron Transport Equation Applied to Generalized Geometries,» Ph. D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, 1992.

6. Басс Л.П., Волощенко А.М., Гермогенова Т.А., Методы дискретных ординат в задачах о переносе излучения, Ин. прикл. матем. им. М.В. Келдыша АН СССР, 1986.

7. Дедуль А.В., Николаев А.А. Программа «PMSNSYS» для многогруппового расчета реакторов методом дискретных ординат // Научно-техническая конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам: сб. тр. науч. конф. – Подольск, 2011. – на CD.

8. Дедуль А.В., Николаев А.А. «PMSNSYS» - программа расчетов нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем с учетом эффектов пространственной гетерогенности. // Тяжелое машиностроение, 2014, № 9, с. 41-46. 9. Дедуль А.В., Николаев А.А., Скобелев А.Н. Верификация Sn метода на неструктурированных сетках применительно к расчету проектных характеристик и безопасности перспективных БР с ТЖМТ. // Научнотехническая конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам: сб. тр. науч. конф.– Подольск, 2013. – на CD.

10. Дедуль А.В., Николаев А.А., Скобелев А.Н. и др. Расчетные коды ОКБ «ГИДРОПРЕСС» для обоснования нейтронно-физических характеристик РУ с ТЖМТ // Международная научно-техническая конференция «50 лет БФС»: тезисы докладов – Обнинск, 2012, с. 74-75.

11. Николаев А.А., Скобелев А.Н. Ревизия верификационной базы тестовых задач в обоснование расчётов активных зон БР с ЖМТ // Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике»: доклады. – Москва, 2014, с. 355-360.

12. Дедуль А.В., Николаев А.А., Воронков А.В. Возможности программы PMSNSYS и их применение к расчетам эффективности стержней СУЗ РУ СВБР-100 // Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики: сборник докладов ежегодных межведомственных семинаров 2009-2011 гг. – Обнинск, 2012, с. 286-294.

13. Rulko R.P., Belal M., Tomasevic D.I. Heterogeneous 3-D SN Transport Reactor Calculations Using Attila. Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA + MC2010). Tokyo, Japan, October 17-21, 2010.

14. Николаева О.В., Басс Л.П. Алгоритм решения уравнения переноса излучения на неструктурированных тетраэдральных сетках. Программа Радуга-Т // Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики (Нейтроника-2014): материалы семинара.— Обнинск, 2014, с. 22.

15. Transport Calculations for Nuclear Analyses: Theory and Guidelines for Effective Use of Transport Codes. LA-10983-MS, LANL, 1987.

16. Дедуль А.В., Николаев А.А. «REBEL» - программа пре- и постпроцессинга расчетов нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем // Тяжелое машиностроение. – 2014, № 8, с. 39-45.

17. Takeda T., Ikeda H. 3-D Neutron Transport Benchmarks, NEACRP-L-330, OECD/ NEA NEACRP, 1991.

18. Семенова Т.В., Гусев Е.А., Артемьева Е.В. и др. Возможности программы ТDMCC для расчета кампаний реакторов // Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2012): программа и тезисы.– Обнинск, 2012, с.72.

Контактная информация -

Николаев Александр Александрович, заместитель начальника отдела, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», тел.: +7(495)502-79-13, e-mail:nikolaev\_aa@grpress.podolsk.ru

Статья поступила в редакцию 25.05.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 51 – 58.

# ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ PMSNSYS НА МЕТОДИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ Т. ТАКЕДЫ

### А.Н. Скобелев, А.А. Николаев

(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

Представлены результаты верификации DDL-схем GQ-метода. Данные схемы реализованы в программе PMSNSYS. Верификация проводилась на примере расчета методических задач из сборника бенчмарков Т. Такеды.

**Ключевые слова:** *PMSNSYS*, верификация, эффективный коэффициент размножения нейтронов, групповые потоки, бенчмарк, Т. Такеда, DDL-схемы.

**VERIFICATION OF PROGRAM PMSNSYS BY METHODICAL TESTS T. TAKEDA.** / **A.N. SKOBELEV, A.A. NIKOLAEV** // Verification results of DDL-schemes of GQ-method are presented. The given schemes are realized in program PMSNSYS. Verification was performed by benchmarks collection of T. Takeda.

*Key words: PMSNSYS, verification, effective neutron multiplication factor, groupwise fluxes, benchmark, T. Takeda, DDL-schemes.* 

### Введение

Для расчетного обоснования активных зон реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» используется программа PMSNSYS [1], реализующая DS<sub>n</sub>-метод дискретных ординат. Возможности программы PMSNSYS позволяют на основе комбинированных сеток, состоящих из прямых призм с правильным шестиугольным, произвольным четырехугольным и произвольным треугольным основанием, строить расчётные модели активных зон, хорошо аппроксимирующие реальные конструкции быстрых реакторов (БР) с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ).

Аппроксимация оператора переноса в программе PMSNSYS осуществляется на основе сочетания алмазных (DD) и алмазоподобных (DDL) схем GQ-метода. При этом DDL-схемы GQ-метода используются только для аппроксимации решения в выпуклых четырёхугольных ячейках произвольной формы (в плоскости X-Y). Для пре- и постпроцессинга при создании сеток и выполнении расчетов используется программа REBEL [2].

В [3] отмечено, что поскольку конечноразностные уравнения GQ-метода для произвольных четырехугольников базируются на алмазных разностных соотношениях, то они имеют преимущественно второй порядок точности в расчете интегральных величин, до тех пор, пока ячейки не слишком сильно искажены. Понятие «слишком» определяется пользователем экспериментально. Например, средствами самой программы PMSNSYS путем решения задач на альтернативных сетках из ячеек правильной формы, как это показано на рисунке 1. Оценку погрешности GQ-метода на искаженных ячейках можно осуществлять также путем сравнения с методом Монте-Карло при использовании одинаковых сеточных моделей и групповых констант.

Целью настоящей работы является оценка порядка точности DDL-схем GQ-метода в трехмерной геометрии на сетках, составленных из прямых призм с произвольным выпуклым четырехугольным основанием на примере бенчмарков [4] (рисунок 2), которые широко используются при верификации различных методик и численных схем (см. [5-7]). Следует отметить, что данные, представленные в [4] как эталонные, получены более 20 лет назад, и в настоящей работе были уточнены с позиции применения современных вычислительных мощностей и увеличения объёма статистических данных. Для этого была использована Монте-Карло программа TDMCC [8].



произвольные четырехугольники

правильные четырехугольники

*Puc.1.* Два варианта сеточной аппроксимации поглощающего стержня кластерного типа для оценки погрешности GQ-метода в расчете его эффективности







Рис.2. Бенчмарки из [4] (фрагменты)

### Особенности выполнения расчётов бенчмарков Т. Такеды по программе TDMCC

Формат представления ядерных данных программы TDMCC для выполнения групповых расчётов требует непосредственного задания  $\sigma_f$  и  $\sigma_c$ , в то время как в [4] приведены лишь основные сечения  $\sigma_i$ ,  $\sigma_a$ ,  $v\sigma_f$  и матрицы групповых переходов. Необходимые сечения могут быть получены из имеющихся  $\sigma_a$ ,  $v\sigma_p$  если выполнить оценку групповых значений v, которая определяется составом топливной композиции и нейтронным спектром активной зоны.

В [4] приведён состав топливной композиции для первого бенчмарка, что позволяет достаточно надёжно выполнить оценку групповых значений v. Такая оценка была выполнена для бесконечной топливной среды с использованием программы PMSNSYS и системы подготовки констант CONSYST 0601/БНАБ-93 [9]. Для остальных бенчмарков Т. Такеды из описания [4] известно только, что в качестве делящегося материала использовалось МОХ-топливо. Определение групповых значений у для этих бенчмарков было проведено с использованием 28-ми групповых значений ус, о, и нейтронного спектра модели реактора БН-600 [10], полученных по результатам расчётов по программе PMSNSYS с системой подготовки констант CONSYST 0601/ БНАБ-93 с последующей свёрткой в требуемую энергетическую разбивку [4].

Далее, необходимые значения  $\sigma_{f}$  и  $\sigma_{c}$  были вычислены из известных  $\sigma_{a}$ ,  $v\sigma_{f}$ , v. Получение недостающих сечений позволило выполнить расчёты по программе TDMCC в групповом приближении.

Для определения масштаба влияния принятых допущений (при получении четырёх групповых значений v) на расчёт К<sub>эфф</sub> была проведена оценка, при которой

значения v принимались соответствующими только  $v_5$  или только  $v_9$ . Результаты расчётов приведены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что неопределённостью v, обусловленной принятыми допущениями при получении  $\sigma_f$  и  $\sigma_c$ , вполне можно пренебречь, если результаты расчётов представлять в соответствии с [4] – с точностью до четвёртой значащей цифры для  $K_{3\phi\phi}$  и до третьей – для эффективности поглощающих стержней.

Для уточнения эталонных результатов расчётов по программе TDMCC окончание счёта производилось при достижении расчётной точности К<sub>эфф</sub>, равной ± 0,00001 ∆k, что примерно на два порядка превышает точность значений, представленных в [4]. Точность расчёта плотности групповых потоков, выполненная только для бенчмарка № 1, составляет не хуже 0,005 отн.%. Достигнутая точность делает выполненные расчёты очень строгим тестом.

Таблица 1

Бенчмарк	Конфигурация активной зоны	Статистическая точность расчёта К <sub>эфф</sub> , %∆k	Влияние v, %∆k
1	1	$\pm 0,001$	- 0,0022
1	2	± 0,001	- 0,0017
3	3	± 0,001	+ 0,0015
4	2	$\pm 0,001$	- 0,0065

Оценка неопределённости  $\mathbf{K}_{_{3\phi\phi}}$  от принятых допущений при получении  $\sigma_f$  и  $\sigma_c$ 

### Получение асимптотических значений К<sub>эфф</sub> по программе PMSNSYS

Расчёты по PMSNSYS выполнены с использованием ES<sub>n</sub>-квадратур Карлсона. Исследование выбора асимптотического значения размера пространственной сетки проводилось путём дробления ячеек сетки в соответствии с таблицей 2. Исследование проводилось при практически асимптотическом значении порядка квадратурных коэффициентов (S<sub>64</sub>). Исследование зависимости решения от угловой переменной проводилось путём увеличения порядка квадратурных коэффициентов от S<sub>4</sub> до S<sub>64</sub> на практически асимптотических по пространственным переменным расчётных сетках. По результатам расчётов получена зависимость  $K_{3\phi\phi}$  как функции пространственной и угловой переменной, что позволило выполнить экстраполяцию результата на нулевую пространственную и угловую сетку. Результаты расчётов  $K_{3\phi\phi}$  и эффективности стержней приведены в таблицах 3-5.

Таблица 2



### Варианты измельчения пространственной сетки

Бенчмарк		Вариант измельчения ячеек расчётной сетки (см. таблицу 2)								
		a)	ნ)	в)	г)	д)	$\rightarrow \infty$			
	конф. 1	0,973637	0,976770	0,977192	0,977277	0,977297	0,977304			
1	конф. 2	0,956336	0,961278	0,962126	0,962321	0,962368	0,962384			
	ЭУС	1,8581E-02	1,6499E-02	1,6025E-02	1,5903E-02	1,5873E-02	1,5863E-02			
	конф. 1	0,973469	0,973637	0,973679	0,973689	-	0,973692			
2	конф. 2	0,959270	0,959560	0,959648	0,959670	-	0,959677			
	ЭУС	1,5205E-02	1,5067E-02	1,5016E-02	1,5003E-02	-	1,4999E-02			
	конф. 1	0,970660	0,971454	0,971683	-	-	0,971759			
	конф. 2	1,000662	1,001199	1,001330	-	-	1,001374			
3	конф. 3	1,021295	1,021822	1,021953	-	-	1,021997			
	ЭУС	3,0888E-02	3,0582E-02	3,0470E-02	-	-	3,0433E-02			
	ЭКС	2,0189E-02	2,0158E-02	2,0153E-02	-	-	2,0151E-02			
	конф. 1	1,093123	1,091809	1,094444	1,095054	1,095203	1,095253			
4	конф. 2	0,993784	0,976429	0,982049	0,983218	0,983511	0,983609			
4	конф. 3	0,903946	0,866191	0,877029	0,879217	0,879764	0,879946			
	ЭУС	1,9145E-01	2,3857E-01	2,2651E-01	2,2418E-01	2,2360E-01	2,2341E-01			

# Зависимость К<sub>эфф</sub> и эффективности поглощающих стержней от пространственной переменной

В настоящей работе приняты следующие условные обозначения:

ЭУС – эффективность управляющих стержней;

ЭКС – эффективность каналов стержней,

конф. – конфигурации бенчмарков, различающиеся положениями поглощающих стержней (подробнее в [4])

### Таблица 4

# Зависимость К<sub>эфф</sub> и эффективности поглощающих стержней от угловой переменной

Бенчмарк		Количество квадратурных коэффициентов S <sub>n</sub>									
		n = 4	n = 8	n = 16	n = 24	n = 32	n = 64	$\mathbf{n} \rightarrow \infty$			
	конф. 1	0,976978	0,977239	0,977322	0,977310	0,977302	0,977297	0,977295			
1	конф. 2	0,962341	0,962459	0,962402	0,962383	0,962376	0,962368	0,962365			
	ЭУС	1,5568E-02	1,5714E-02	1,5863E-02	1,5871E-02	1,5870E-02	1,5873E-02	1,5874E-02			
	конф. 1	0,973615	0,973673	0,973686	0,973687	0,973688	0,973689	0,973689			
2	конф. 2	0,959606	0,959654	0,959667	0,959669	0,959669	0,959670	0,959670			
	ЭУС	1,4994E-02	1,5003E-02	1,5003E-02	1,5002E-02	1,5003E-02	1,5003E-02	1,5003E-02			
	конф. 1	0,971803	0,971718	0,971692	0,971687	0,971685	0,971683	0,971682			
	конф. 2	1,001453	1,001368	1,001341	1,001335	1,001332	1,001330	1,001329			
3	конф. 3	1,022078	1,021989	1,021963	1,021957	1,021955	1,021953	1,021952			
	ЭУС	3,0466E-02	3,0471E-02	3,0472E-02	3,0471E-02	3,0470E-02	3,0470E-02	3,0470E-02			
	ЭКС	2,0150E-02	2,0150E-02	2,0152E-02	2,0152E-02	2,0153E-02	2,0153E-02	2,0153E-02			
	конф. 1	1,095054	1,095213	1,095212	1,095207	1,095205	1,095203	1,095202			
4	конф. 2	0,983522	0,983565	0,983528	0,983517	0,983514	0,983511	0,983510			
4	конф. 3	0,880009	0,879852	0,879787	0,879772	0,879768	0,879764	0,879763			
	ЭУС	2,2316E-01	2,2349E-01	2,2357E-01	2,2359E-01	2,2359E-01	2,2360E-01	2,2360E-01			

Бенчмарк	Конф. 1	Конф. 2	Конф. З	ЭУС	ЭКС
1	0,977302	0,962381	-	1,5864E-02	-
2	0,973692	0,959677	-	1,4999E-02	-
3	0,971758	1,001373	1,021996	3,0433E-02	2,0151E-02
4	1,095252	0,983608	0,879945	2,2341E-01	-

### Экстраполированные на нулевую пространственную и угловую сетку значения, рассчитанные по программе PMSNSYS

### Сравнение результатов расчётов по PMSNSYS и TDMCC с данными Т. Такеды

Результаты расчётов экстраполированных на нулевую пространственную и угловую сетку значений К<sub>эфф</sub> и эффективности поглощающих стержней по программе PMSNSYS в сравнении с данными из [4] и результатами расчётов по Монте-Карло программе TDMCC представлены в таблице 6.

Видно, что значения  $K_{3\phi\phi}$  в таблице 6 (и, соответственно, эффективность стержней), полученные на регулярных сетках по PMSNSYS, совпадают с методом Монте-Карло с точностью до четырёх значащих цифр.

В таблице 7 представлены результаты расчётов плотности группового потока нейтронов для бенчмарка № 1, рассчитанные по PMSNSYS (с использованием асимптотической по пространственной и угловой переменной расчётной модели) и TDMCC в сравнение с данными из [4]. Из таблицы видно, что улучшение статистической точности приводит к уменьшению расхождения значений плотности потоков между DS<sub>n</sub>-методом (PMSNSYS) и методом Монте-Карло с ~0,2 отн.% до не более чем 0,02 отн.%.

Из полученных результатов видно, что улучшение статистической точности расчета привело к заметному уточнению ряда эталонных значений [4] (что относится как к К<sub>эфф</sub>, так и к групповым потокам).

Таблица б

	Конфигурация и		Результаты расчётов	
Бенчмарк	рассчитываемая величина	[4] (1991 год)	ТDМСС (2015 год)	РМSNSYS (2015 год)
	К <sub>эфф</sub> , конф. 1	$0,9780 \pm 0,0006$	0,9773	0,9773
1	К <sub>эфф</sub> , конф. 2	$0,9624 \pm 0,0006$	0,9624	0,9624
	ЭУС, Δρ	$1,66\text{E-}02 \pm 0,0009$	1,59E-02	1,59E-02
	К <sub>эфф</sub> , конф. 1	$0,9732 \pm 0,0002$	0,9736	0,9737
2	К <sub>эфф</sub> , конф. 2	$0,9594 \pm 0,0002$	0,9596	0,9597
	ЭУС, Δρ	$1,47\text{E-}02 \pm 0,0003$	1,50E-02	1,50E-02
	К <sub>эфф</sub> , конф. 1	$0,9709 \pm 0,0002$	0,9718	0,9718
	К <sub>эфф</sub> , конф. 2	$1,0005 \pm 0,0002$	1,0014	1,0014
3	К <sub>эфф</sub> , конф. 3	$1,0214 \pm 0,0002$	1,0220	1,0220
	ЭУС, Δρ	$3,05\text{E-}02 \pm 0,0003$	3,04E-02	3,04E-02
	ЭКС, Δρ	$2,05\text{E-}02 \pm 0,0003$	2,02E-02	2,02E-02
	К <sub>эфф</sub> , конф. 1	$1,0951 \pm 0,0004$	1,0952	1,0953
4	К <sub>эфф</sub> , конф. 2	$0,9833 \pm 0,0004$	0,9836	0,9836
4	К <sub>эфф</sub> , конф. 3	$0,8799 \pm 0,0003$	0,8799	0,8799
	ЭУС, Δρ	$2,23E-01 \pm 0,001$	2,23E-01	2,23E-01

## Результаты расчётов значений К<sub>эфф</sub> и эффективности поглощающих стержней по программам TDMCC и PMSNSYS

			Область					
	Результат		Активная зона	Отражатель	Полость	Поглощающие стержни		
	[4]	Группа 1	4,7509E-03	5,9251E-04	1,4500E-03	-		
	(1991 год)	Группа 2	8,6998E-04	9,1404E-04	9,7406E-04	-		
Voud 1	TDMCC	Группа 1	4,7656E-03	5,9401E-04	1,4465E-03	-		
Конф. 1 (2015 год) РМSNSYS	(2015 год)	Группа 2	8,7173E-04	9,1590E-04	9,7031E-04	-		
	PMSNSYS (2015 год)	Группа 1	4,7655E-03	5,9411E-04	1,4467E-03	-		
		Группа 2	8,7174E-04	9,1601E-04	9,7039E-04	-		
	[4]	Группа 1	4,9125E-03	5,9109E-04	-	1,2247E-03		
	(1991 год)	Группа 2	8,6921E-04	8,7897E-04	-	2,4604E-04		
Vout 2	TDMCC	Группа 1	4,8984E-03	5,9004E-04	-	1,2245E-03		
Конф. 2	(2015 год)	Группа 2	8,6757E-04	8,8124E-04	-	2,4559E-04		
	PMSNSYS	Группа 1	4,8983E-03	5,9012E-04	-	1,2247E-03		
	(2015 год)	Группа 2	8,6758E-04	8,8132E-04	-	2,4562E-04		

### Результаты расчётов значений плотности группового потока по программам **TDMCC и PMSNSYS**

### Расчёт бенчмарка № 2 с использованием нерегулярных сеток

Как отмечено во введении, методическая погрешность DDL-схем GQ-метода определяется степенью отличия формы ячеек сетки от правильной четырехугольной формы многоугольника в основании прямой призмы (степенью искажения ячеек). Оценка степени погрешности и порядка точности DDL-схем GQ-метода как функции степени искажения ячеек выполнена с использованием бенчмарка № 2 на соответствующих сетках.

Три соответствующие сеточные модели были получены из исходной сетки, составленной из прямоугольных ячеек с размером мм, путем смещения вершин ячеек (в 50 плоскости Х-У) на случайную величину до 10, 20 и 25 мм, (20%, 40% и 50% относительно размера исходной расчётной ячейки), см. рисунок 3.

Для определения порядка точности численной схемы для каждой из представленных на рисунке 3 сетки проводилось последовательное измельчение ячеек половинным дроблением в плоскости Х-У и по высоте



Деформация до 20 мм

Деформация до 25 мм

Рис. 3. Искажение (деформация) ячеек расчётной модели

(аналогично таблице 2), и последующее сравнение результатов расчётов на таких сетках.

Результаты расчётов  $K_{3\phi\phi}$  как функции размеров и степени искажения ячеек представлены в таблицах 8 – 10. Из результатов, приведённых в таблице 8 видно, что методическая погрешность GQ-метода убывает при уменьшении размеров ячеек. Также по результатам расчётов (таблицы 9, 10) прослеживается второй порядок точности численной схемы по определению  $K_{3\phi\phi}$  как для регулярных сеток, так и для сеток из прямых призм с произвольным четырёхугольным основанием.

При исследовании порядка точности в расчете плотности потока нейтронов как

функции степени искажения ячеек, значения, полученные на измельченных сетках, интерполировались в «родительскую» сетку неизмельченную) пропорцио-(исходную нально объемным долям пересечений ячеек двух сеток (т.о. обеспечивалось сохранение баланса). В данном исследовании рассматривались потоки нейтронов первой группы, результаты расчётов приведены в таблице 11. Из таблицы 11 видно, что при измельчении ячеек сетки в 2 раза (вдоль каждого ребра ячейки), локальная ошибка определения плотности потока уменьшается в 4 раза, что также подтверждает второй порядок точности численной схемы.

Таблица 8

D	Вариант измельчения ячеек расчётной сетки (см. таблицу 2)							
гасчетная сетка	a)	ნ)	в)	г)	д)			
Исходная	0,959268	0,959558	0,959643	0,959666	-			
Деформация до 10 мм	0,958686	0,959516	0,959640	0,959666	-			
Деформация до 20 мм	0,957231	0,959423	0,959629	0,959664	0,959671			
Деформация до 25 мм	0,955840	0,959341	0,959620	0,959662	-			

### Влияние искажения ячеек на $K_{_{3bb}}$ (S<sub>16</sub>)

### Таблица 9

Изменение  $K_{_{3\varphi\varphi}}$  при измельчении пространственной сетки, в  $\Delta k$ 

Расчётная сетка	Результат сравнения двух сеток				
	а) с б)	б) с в)	в) с г)	г) с д)	
Исходная	-2,90E-04	-8,58E-05	-2,26E-05	-	
Деформация до 10 мм	-8,31E-04	-1,24E-04	-2,57E-05	-	
Деформация до 20 мм	-2,19E-03	-2,05E-04	-3,53E-05	-7,48E-06	
Деформация до 25 мм	-3,50E-03	-2,79E-04	-4,23E-05	-	

### Таблица 10

### Отношение изменения К эфф при измельчении сеток

Расчётная сетка	Результат сравнения двух сеток				
	а) с б)	б) с в)	в) с г)	г) с д)	
Исходная	-	3,38	3,80	-	
Деформация до 10 мм	-	6,72	4,81	-	
Деформация до 20 мм	-	10,67	5,82	4,72	
Деформация до 25 мм	-	12,53	6,61	-	



### Изменение плотности потока нейтронов 1-й группы при измельчении сетки, %

### Заключение

Выполнена верификация DDL-cxem GQ-метода, реализованных в программе PMSNSYS, применительно к расчету К<sub>эфф</sub> бенчмарков Т. Такеды [4]. При выполнении исследования для четырех бенчмарк-задач [4] с использованием Монте-Карло программы ТDMCC получены значения  $K_{_{3\phi\phi}}(u)$  эффективности стержней) с улучшенной статистической точностью (~ на два порядка по сравнению с [4]). Увеличение объема используемых статистических данных привело к заметному уточнению ряда эталонных значений [4]. В результате, для четырех рассмотренных бенчмарков получено полное совпадение значений К<sub>эфф</sub> и эффективности стержней, а также (для бенчмарка № 1) плотности потока нейтронов, полученных по PMSNSYS и TDMCC.

На одном из бенчмарков показано, что на сетках, составленных из прямых призм с произвольным четырехугольным основанием, даже при искажении ячеек масштаба до ~50 % от исходной правильной формы сохраняется порядок точности численных DDL-схем GQ-метода, близкий ко второму как в расчете  $K_{_{3}\phi\phi}$ , так и в расчете локальных значений плотности потока нейтронов.

### Список литературы

1. Дедуль А.В., Николаев А.А. «PMSNSYS» - программа расчетов нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем с учетом эффектов пространственной гетерогенности // Тяжелое машиностроение, 2014, № 9, с. 41-46.

2. Дедуль А.В., Николаев А.А. «REBEL» - программа пре- и постпроцессинга расчетов нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем // Тяжелое машиностроение, 2014, № 8, с. 39-45.

3. DANTSYS 3.0: One-,Two-, and Three-Dimensional, Multigroup, Discrete-Ordinate Transport Code System / R.E. Alcouffe, R.A. Baker, F.W. Brinkley, D.R. Mar, R.D. O'Dell, W.F. Walters // LA-12969-M. – Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA, 1995. 4. Takeda T., Ikeda H. 3-D Neutron Transport Benchmarks, NEACRP-L-330, OECD / NEA NEACRP, 1991.

5. J. Bryce Taylor, Dave Knott, Anthony J. Baratta. A method of characteristics solution to the OECD/NEA 3d neutron transport benchmark problem. Joint International Topical Meeting on Mathematics & Computation and Supercomputing in Nuclear Applications (M&C + SNA 2007) Monterey, California, April 15-19, 2007.

6. Kirsten F. Laurin-Kovitz, E.E. Lewis. Perturbation theory based on the variational nodal transport method in X-Y-Z geometry. Contributed Paper to be submitted for ANS Portland topical meeting (ME) in April 1995.

7. Kenji Yokohama. Development of common user data model for APPOLO3 and marble and application to benchmark problems. JAEA-Research, July 2009-http://jolissrch-inter. tokai-sc.jaea.go.jp (дата просмотра 22.04.2015).

8. Семёнова Т.В., Гусева Е.А., Артемьева Е.В., Рослов В.И., Туваева А.В. Новые возможности программы TDMCC решения уравнения переноса методом Монте-Карло. Сборник докладов. Нейтроннофизические проблемы атомной энергетики «Нейтроника-2011». Обнинск, октябрь 2012.

9. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Поляков А.Ю., Цибуля А.М. Аннотация программы CONSYST // Вопросы атомной науки и техники: Серия: Ядерные константы. - М., 1999, вып.2, с.148.

10. Working Material. The Fourth Research Coordination Meeting on "Updated Codes and Methods to Reduce the Calculational Uncertainties of the LMFR Reactivity Effects", "BN-600 HYBRID CORE BENCHMARK ANALYSES", Y. I. Kim and A. Stanculescu, PHYSOR 2002, Seoul, Korea, October 7-10, 2002.

Контактная информация -

Скобелев Александр Николаевич, инженер-конструктор 2 категории, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», тел.: +7(495)502-79-13, доб. 17-86, e-mail:nikolaev\_aa@grpress.podolsk.ru

Статья поступила в редакцию 25.05.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 59 – 67

### ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ТОПЛИВА НА АЭС «ПАКШ»

### А.В. Гришаков, В.Б. Лушин

(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

Описана процедура перевода блоков АЭС «Пакш» на эксплуатацию с использованием модернизированных кассет с уран-гадолиниевым топливом в новом 4-х годичном топливном цикле. Указывается конкретная величина экономического эффекта внедрения новой топливной составляющей с учетом плановой продолжительности работы всех четырех блоков АЭС. Перечислены предприятия-участники работ по контракту с описанием их конкретного вклада в общий объем обосновывающей документации. Приводится перечень и формат оформления проектных критериев, требующих пересмотра и нового обоснования в связи с внедрением модернизированного топлива на блоках АЭС «Пакш». Приводится перечень основных нормативно технических документов, как действующих в РФ, так и в ВР, на основании которых проводилось обоснование изменения проектных материалов РУ.

**Ключевые слова:** АЭС «ПАКШ»; U-Gd топливо; топливный цикл; проектные требования; проектные критерии; активная зона; топливная сборка; выгорание топлива.

JUSTIFICATION OF INTRODUCTION OF THE MODERNIZED FUEL AT "PAKS" NPP / A.V. GRISHAKOV, V.B. LUSHIN // The paper describes a procedure for transfer the Paks NPP Unit reactors to operation with the modernized fuel assemblies with U-Gd fuel in a new 4 year fuel cycle. A specific figure of the economic effect achieved due to introduction of the new fuel component is given in view of the scheduled length of operation of all four NPP Units. The enterprises participating in the work under the contract are listed with description of their specific contribution to the total scope of the justification documentation. The paper also covers the list and format of the design criteria formalization that require a revision and new justification of the modernized fuel due to its introduction at the Paks NPP Units. The list of the basic regulatory and engineering documentation is provided that is valid both in the Russian Federation and in Hungary and makes the basis for justification of the change of RP design materials.

**Key words:** "Paks" NPP; U-Gd fuel; fuel cycle; design requirements; design criteria; core; fuel assembly; fuel burn-up.

Начиная с 2006 года, блоки АЭС «Пакш» эксплуатируются на мощности 1485 МВт (108 % N<sub>ном</sub>) с топливными профилированными кассетами второго поколения среднего обогащения 4,2 % по урану 235. В 2011 году был выбран для внедрения на блоках АЭС перспективный 15-месячный топливный цикл с использованием профилированных кассет второго поколения с уран-гадолиниевым топливом обогащения 4,7 % по урану 235. Последовательное внедрение такого топливного цикла на всех четырех блоках АЭС «Пакш» позволяет увеличить продолжительность кампании каждого блока в среднем на 25 эффективных суток, что одновременно с оптимизацией запланированных сроков перегрузок всех четырех блоков в течение 5-ти летнего топливного цикла эксплуатации АЭС, а также связанного с этим уменьшения стоимости капитального ремонта оборудования и уменьшения количества радиоактивных отходов, улучшает экономические показатели эксплуатации АЭС «Пакш» по оценке вегерских специалистов в целом на 20 %.

Работа по обоснованию безопасности перевода блоков АЭС на новый топливный цикл включала выпуск обосновывающих материалов, подтверждающих их выполнение проектных критериев, изложенных в основном проектном документе - «Отчете о проектных требованиях». В работах по выпуску обосновывающих материалов, подтверждающих изложенные в отчете проектные критерии, принимали участие генеральный конструктор реакторной установки ОКБ «ГИДРОПРЕСС», научный руководитель технического проекта реакторной установки НИЦ «Курчатовский институт», а также разработчик технического проекта твэла и комплексной технологии по его изготовлению ВНИИНМ им Бочвара.

Каждое из предприятий в соответствии с техническими приложениями к контракту между ОАО «ТВЭЛ» (Поставщиком топлива) и АЭС «Пакш» выполняло свою часть работ, подтверждающих проектные критерии, заложенные в технический проект активной зоны блоков АЭС «Пакш» и приведенные в «Отчете о проектных требованиях». По принятому разделению работ ОКБ «ГИДРОПРЕСС» ответственен за механическую часть проекта (прочностные расчеты), а также за обоснование теплогидравлической надежности работы активной зоны блоков АЭС как в номинальном режиме, так и в режимах нарушения нормальной эксплуатации, включая проектные аварии. Кроме того, ОКБ «ГИДРОПРЕСС» осуществлено общее руководство работами, а также корректировка действующей документации технического проекта на комплекс кассет второго поколения для реактора ВВЭР- 440, являясь разработчиком технического проекта активной зоны.

НИЦ «Курчатовский институт» обоснована физическая часть проекта путем выпуска соответствующих поверочных расчетов проекта внедрения нового топливного цикла, включая обоснование рамочных параметров работы активной зоны и реакторной установки в целом, а также проведен сравнительный анализ результатов расчетов с параллельными расчетами АЭС «Пакш». Кроме того, НИЦ «Курчатовский институт» выпущены расчеты реактивностных аварий. В данных расчетах определялось конкретное значение максимально вводимой энтальпии на единицу массы топлива, рассматриваемых техническим проектом сценариев реактивностных аварий. При этом экспериментально определены принятые в проекте допустимые значения среднерадиальной энтальпии, вводимой на единицу массы топлива:

 для выгораний до 50 МВт сут/кг урана – 963 Дж/г (230 кал/г);

– для выгораний более 50 МВт·сут/кг урана – 690 Дж/г (165 кал/г); ВНИИНМ им. Бочвара обоснована работоспособность твэл во всех проектных режимах работы, включая аварийные, а также проведен сравнительный анализ допустимости полученных результатов расчетов с приемочными проектными критериями, приведенными в техническом проекте твэла.

В «Отчете о проектных требованиях» приводятся требования к номенклатуре проектных критериев, причине их введения и необходимому объему расчетно-экспериментального обоснования, который должен быть представлен в техническом проекте активной зоны реакторной установки ВВЭР-440 типа В-213 блоков АЭС «Пакш». Все проектные критерии, рассмотренные в отчете, приводятся с учетом повышения мощности до 108 % и перехода на профилированное урангадолиниевое топливо второго поколения с использованием кассет среднего обогащения 4,7 % и 4,2 % по урану 235. В рамках данного отчета рассматривается топливный цикл из трех загрузок с оставлением части кассет на четвертую загрузку и длительностью 425 эффективных суток. При этом кассеты обогащения 4,2 % (ранее используемые как штатные на блоках АЭС «Пакш») используются только в переходных загрузках эксплуатации активной зоны до выхода в стационарный режим перегрузок с последующим использованием кассет только обогащения 4,7 %.

Максимальное расчетное выгорание топлива в данном топливном цикле не должно превышать (с учетом коэффициентов запаса) в кассете 59 МВт·сут/кг U, в твэле 65 МВт·сут/ кг U, в таблетке 74 МВт·сут/кг U.

Активная зона реактора блоков АЭС «Пакш» состоит из 349 кассет, из которых:

312 составляют неподвижные рабочие кассеты (РК);

 - 37 составляют подвижные кассеты аварийные, регулирующие, компенсирующие (АРК).

Пучок модернизированных кассет (как кассет АРК, так и рабочих кассет) состоит из 120 твэлов и 6 твэгов и размещается в шестигранной чехловой трубе по треугольной решетке с шагом 12,3 мм. Чехловая труба механически соединена с концевыми деталями. Материал твэльной трубки и чехловой трубы - циркониевые сплавы. Твэл представляет цилиндрическую оболочку, закрытую с торцев заглушками с помощью контактностыковой сварки. Внутри оболочки находится столб топлива, собираемый из таблеток из диоксида урана. Столб топлива закреплен от перемещения при транспортировании фиксатором пружинного типа из железохромоникелевого сплава.

Твэл ТВС кассеты АРК по своей конструкции аналогичен твэлу рабочей кассеты и отличается от него тем, что для компенсации всплесков нейтронного поля над столбом топлива установлен столбик из хромоникелевой нержавеющей стали аустенитного класса типа 08X18H10Т. В конструкции РК и ТВС кассеты АРК применяются твэлы с гадолиниевым поглотителем (твэги). Материал поглотителя - оксид гадолиния  $Gd_2O_3$ , массовая доля в химическом составе таблетки - 3,35 %.

По конструкции твэг не отличается от твэла за исключением интегрированного в топливную таблетку оксида гадолиния  $Gd_2O_3$ . Твэл/твэг двухшовной герметизации и наружным диаметром 9,1 мм снаряжается столбом цилиндрических топливных таблеток из диоксида урана плотностью 10,4÷10,7 г/см<sup>3</sup>, диаметр топливной таблетки составляет 7,60 мм, а внутренний диаметр твэльной трубки равняется 7,73 мм. При этом масса столба топлива в твэле PK составляет 1141 грамм, а в твэле TBC APK – 1080 грамм.

Конструкция кассеты позволяет снять (демонтировать) концевую деталь-головку, соединенную с чехловой трубой, с пучка кассеты и сделать его доступным. Данная операция позволяет провести осмотр и ревизию пучка на специальном стенде в случае его наличия в проекте АЭС и, при необходимости, извлечь обнаруженные негерметичные твэлы и заменить их на вытеснители или оставить ячейки демонтируемых твэлов пучка пустыми, заполненными теплоносителем.

Расположение твэлов/твэгов различного обогащения (схема профилирования пучка) показана на рисунке.

Проектные критерии, изложенные в «Отчете о проектных требованиях, соответствуют требованиям нормативных документов действующих в Венгрии, таких как: «Правила безопасности NUREG-0800», ядерной Regulatory Guide 1.70, а также требованиям Российских нормативных документов, таких как: «Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций» (НП-082-07) ПНАЭ Г-01-011-97, требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности АС с реакторами типа ВВЭР НП-006-98 (ПНАЭ Г-01-036-95), а также ГОСТ Р 50088-92 «Реакторы ядерные водо-водяные (ВВЭР). Общие требования к проведению физических расчетов». Кроме того



*Puc.1.* Схема профилирования пучка модернизированных кассет блоков АЭС «Пакш» среднего обогащения 4,7 %
проектные критерии формировались с учетом накопленных знаний и опыта эксплуатации атомных станций с реакторными установками типа ВВЭР-440, тип В-213.

В объем материалов, изложенных в «Отчете о проектных требованиях», входили следующие проектные критерии, выполнение которых проверялось в процессе выпуска обосновывающих материалов проекта и приводилось в итоговом документе - «Отчете о выполнении проектных требований».

#### Проектные критерии твэла

Прочностные критерии твэла:

 коррозионное растрескивание под напряжением в присутствии агрессивных продуктов деления;

 предельные эквивалентные напряжения в оболочке;

 потеря окружной устойчивости оболочки от перепада давления;

 усталостная и длительная прочность оболочки;

 предельная остаточная деформация оболочки;

 предельное значение изменения диаметра оболочки;

предельное значение удлинения твэла;

Теплофизические критерии:

предельная температура топлива;

 предельное значение газов под оболочкой.

Коррозионные критерии (КС):

 окисление наружной поверхности оболочки;

- гидрирование оболочки.

Фретинг - износа оболочки.

Эксплуатационный критерий предельной линейной мощности твэла.

#### Прочностные критерии кассет активной зоны и ее конструктивных элементов

 приведенные мембранные напряжения;

 приведенные мембранные напряжения по суммам общих или местных изгибных напряжений;

 допустимая динамическая перегрузка при транспортировании и погрузочно-разгрузочных работах в составе транспортно-упаковочного комплекта. Одновременно, в объем отчета о проектных требованиях, безопасность которых по просьбе Заказчика также должна быть обоснована в разделе Прочностные критерии кассет, входили следующие элементы конструкции кассет:

- чехловая труба;

- дистанционирующие решетки;

 центральная труба, используемая в качестве измерительного канала системы внутри реакторного контроля;

узлы крепления и механические соединения;

 верхняя и нижняя концевые детали рабочей кассеты и тепловыделяющей сборки кассеты аварийной, регулирующей компенсирующей;

 сварные швы рабочей кассеты и тепловыделяющей сборки кассеты аварийной, регулирующей, компенсирующей;

нижняя опорная решетка;

– требования по допустимому формоизменению пучка твэлов в процессе работы.

Кроме того, в данный раздел входили требования предъявляемые к материалам:

 требования к материалам рабочей кассеты и тепловыделяющей сборки кассеты аварийной, регулирующей, компенсирующей;

требования к совместимости материалов.

#### Критерии физического проекта

инженерные коэффициенты запаса;

выгорание топлива;

- обогащение топлива;

реактивность активной зоны;

 обратные связи, влияющие на реактивность (коэффициенты реактивности);

 контроль и управление распределением энерговыделения в активной зоне;

 эффективность систем, воздействующих на реактивность, механическая система регулирования;

 скорость ввода положительной реактивности;

 управление реактивностью борным раствором;

 минимальная подкритичность при перегрузке топлива и комплексных испытаниях органов системы управления защитой;

подкритичность при обращении с топливом.

#### Теплогидравлические критерии активной зоны

запас до кризиса теплоотдачи;

 условия охлаждение топливной сборки;

– гидравлическая стабильность.

 недопущение всплытия кассет активной зоны.

# Критерии безопасности для постулируемых аварий:

 минимальный коэффициент запаса до кризиса кипения;

 ограничение охрупчивания материала оболочки твэла;

 ограничение генерации водорода в результате окисления циркония в активной зоне;

недопустимость плавления топлива;

 недопустимость фрагментации твэлов в авариях с быстрым возрастаниям реактивности;

 оценка количества разгерметизировавшихся твэлов в проектных авариях;

 ограничение формоизменения элементов кассет;

 обеспечение подкритичности при расхолаживании реакторной установки.

Основная часть работ по выпуску материалов, обосновывающих технический проект активной зоны, выполнена в 2013 году. Проведена корректировка документации технического проекта на комплекс кассет второго поколения и откорректированы «Каталожные описания (технические условия на поставку топлива)», получено разрешение инспекционных органов Венгрии на начало эксплуатации блоков АЭС «Пакш» в новом топливном цикле с использованием модернизированных кассет.

По результатам согласования материалов откорректированного технического проекта с Венгерской стороной выяснилось отличие в регламентах выхода блока на мощность после перегрузки. Вследствие этого потребовался выпуск дополнительных расчетов по обоснованию работоспособности твэлов/ твэгов для нового сценария протекания данного режима. Кроме того, были установлены новые величины предельной мощности твэла/твэга. В «Отчете о проектных требованиях» и «Каталожных описаниях» приведена величина максимальной эксплуатационной мощности твэла/твэга, равная 59 МВт сут/кг . Однако для теплогидравлических расчетов режимов с нарушениями нормальной эксплуатации и проектных аварий максимальная мощность твэла в модернизированных кассетах второго поколения среднего обогащения 4,7 % принималась равной 59,5 МВт сут/кг . Данное незначительное увеличение мощности твэла связано с требованием Заказчика (АЭС «Пакш») и было вызвано некоторым отличием исходных данных, принимаемых АЭС «Пакш» для выполнения расчетов аварийных режимов со снижением расхода теплоносителя (остановка трех ГЦН из шести).

Одновременно в технический проект активной зоны и Каталожные описания (Технические условия) введена документация и сформулированы новые технические требования по критериям отказа штатных (обогащением 4,2 % по урану 235) и модернизированных (обогащением 4,7 % по урану 235) кассет активной зоны. Данные технические требования касаются использования в качестве штатного критериального метода контроля герметичности кассет - сиппинг метода.

Данный метод позволяет, также как и штатный пенальный метод, проводить определение количественной величины степени негерметичности кассет активной зоны при их выгрузке из реактора по окончанию эксплуатации или, в случае необходимости, при их перестановках внутри активной зоны реактора при продолжении эксплуатации.

Разработанная АЭС «Пакш» стратегия перехода блоков на новый топливный цикл предусматривала первую переходную загрузку модернизированных кассет в активную зону 3 блока длительностью 360-370 эффективных суток в ППР-2014 (что и было успешно выполнено). В дальнейшем предусматривается последовательное внедрением данного цикла на 1, 2 и 4 блоках в течение четырех последующих лет и выходом всей АЭС на новый топливный цикл к 2017 году.

#### Список литературы

1. Модернизация ядерного топлива и усовершенствование топливных циклов блоков

АЭС «Пакш» при эксплуатации на 1485 МВт тепловой мощности пактивной зоны, Отчет о

проектных требованиях, №У213-Пр-1981, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2013.

Контактная информация -

Гришаков Андрей Викторович, инженер-конструктор 1 категории, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», тел.: +7(916)959-56-67, e-mail:Lushin@grpress.podolsk.ru

Статья поступила в редакцию 20.01.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 68 – 73

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИИ И ФРЕТТИНГ-ИЗНОСА ТВЭЛОВ ТВС-КВАДРАТ

#### Ю.В. Егоров; В.В. Макаров, к.т.н.; А.В. Афанасьев, к.т.н.; И.В. Матвиенко; Н.В.Шарый, д.т.н.

(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

В статье представлены результаты исследований по обоснованию вибропрочности ТВС российского проекта реактора PWR-900 (ТВС-КВАДРАТ). В проекте ТВС-КВАДРАТ применены принципиально новые конструктивные решения, а также новый водно-химический режим, характерный для реакторов PWR. В связи с этим программа исследований включала в себя два этапа:

- исследования гидродинамически возбуждаемой вибрации твэлов в составе полномасштабного макета при теплогидравлических параметрах теплоносителя, близких к параметрам нормальной эксплуатации реактора PWR;

- определение границы фреттинг-износа по итогам длительных испытаний трехпролетных моделей твэлов ТВС-КВАДРАТ с применением электромагнитного способа возбуждения поперечной вибрации и теплогидравлических параметрах теплоносителя, близких к параметрам нормальной эксплуатации реактора PWR.

В результате исследований была разработана и опробована методика обоснования вибропрочности ТВС по условию отсутствия фреттинг-износа, собраны данные по уровню вибраций твэлов в потоке теплоносителя и уровнях вибраций твэлов, при которых развивается фреттинг-износ оболочки. Выработаны рекомендации по дальнейшим испытаниям.

Ключевые слова: фретинг-износ, вибрации, ТВС, твэл, ТВС-КВАДРАТ, область отсутствия износа.

EXPERIMENTAL STUDIES OF VIBRATION AND FRETTING-WEAR OF FA-KVADRAT FUEL / YU.V. EGOROV; V.V. MAKAROV, DSC (ENG.); A.V. AFANASJEV, DSC (ENG.); I.V. MATVIENKO, N.V. SHARY, PROF. // The paper covers the results of the studies to justify vibration strength of the Russian design of FA-K fuel assembly for PWR-900 reactor (FA-KVADRAT). The program of the studies consisted of two stages:

- study of fuel rod flow-induced vibration in a full-scale FA dummy at coolant thermal-hydraulic parameters that are close to the parameters of normal operation of PWR reactor;

- determination of the limiting parameters of fuel rod vibration by the results of long-term tests of the fuel rods of FA-K fuel assembly with the power applied to induce the transverse vibration under the conditions of water chemistry of PWR.

By the results of the first stage of the tests of a full-scale FA-K dummy the levels of fuel rod vibration were determined at coolant thermal-hydraulic parameters close to those standard for PWR reactor, the effect of the structural and process factors on the vibration level was determined.

At the second stage of the fuel rod dummy tests for fretting-wear the effect of the amplitude was determined as well as frequency of fuel rod vibration and the value of the cladding-to-spacer grid cell gap on the depth of fuel rod cladding wear under standard coolant parameters, the estimation was made of the threshold values of the vibration-induced motion of the middle of the span that being exceeded can lead to the development of inadmissible cladding fretting-wear.

Key words: fretting-wear, vibration, fuel rods, FA, FA-K, wear-free area boundary.

#### Введение

Вибрационные нагрузки, которым подвергаются ТВС в процессе эксплуатации

реактора, могут вызывать нарушения безопасной эксплуатации реактора и, в частности, приводить к выходу радиоактивности за пределы оболочек твэлов. Одной из главных причин повреждения оболочек твэлов, влекущей выход радиоактивных продуктов в теплоноситель, повышение дозовых нагрузок на персонал и досрочную выгрузку ТВС, является фреттинг-коррозия оболочек твэлов под дистанционирующими решетками.

Несмотря на высокие достигнутые показатели надежности ТВС, по зарубежным оценкам фреттинг-коррозия оболочек под дистанционирующими решетками остаётся одной из основных причин повреждения ТВС легководных реакторов с водой под давлением. На рисунке 1 представлена статистика отказов твэлов реакторов типа PWR [1]. Доля отказов по причине фреттинг-коррозии твэлов в узлах сопряжения с дистанционирующими решетками ТВС реакторов PWR превышает 50 %.

В связи с этим одной из практических задач конструирования новых ТВС является обеспечение их вибропрочности по условию отсутствия фреттинг-износа. В общем случае для обоснования вибропрочности необходимо определить предельно допустимые уровни вибрации, не вызывающие фреттинг-износа, сравнить их с уровнем вибрации твэлов, создаваемой потоком теплоносителя, и вычислить запас по уровню вибрации твэлов до критического уровня. Данный подход был применен в 1980-е гг. для обоснования пролета твэла длиной 255 мм в бывшей серийной (с ДР из нержавеющей стали) и усовершенствованной (с циркониевыми ДР) ТВС ВВЭР-1000 [2].

В настоящее время этот подход используется для обоснования вибропрочности российского проекта ТВС реактора PWR-900 (ТВС-КВАДРАТ). В докладе представлены результаты исследования гидродинамически возбуждаемой вибрации твэлов в составе полномасштабного макета при теплогидравлических параметрах теплоносителя, близких к параметрам нормальной эксплуатации



Коррозия – Дебриз – Изготовление – Фреттинг – Транспортировка
 Взаимодействие топлива с оболочкой – Неизвестно

### *Рис. 1.* Причины отказов топлива в реакторах PWR

реактора PWR, а также исследования процесса изнашивания на трехпролетных моделях твэлов в аналогичных условиях.

#### Исследования вибрации твэлов ТВС-КВАДРАТ при теплогидравлических параметрах теплоносителя, близких к реакторным

Для обоснования вибропрочности твэлов условию ТВС-КВАДРАТ по отсутствия фреттинг-износа необходимо сопоставить уровень вибрации твэлов в реакторе PWR-900 с границей области отсутствия износа. Ввиду отсутствия информации по уровням вибрации твэлов в реакторе PWR-900 вибрации твэлов ТВС-КВАДРАТ измерялись на однокассетном стенде горячей обкатки в потоке теплоносителя с параметрами, близкими к реакторным. Фактором, определяющим уровень вибрации твэлов, является гидродинамическое воздействие со стороны теплоносителя. Основными компонентами гидродинамического воздействия являются пульсации давления и поперечные перетечки теплоносителя. Уровень пульсаций давления в колонке стенда сопоставим с предельно допустимыми значениями для активной зоны ВВЭР-1000. Учитывая более высокую скорость теплоносителя в активной зоне ВВЭР-1000, можно предположить, что уровень гидродинамической нестабильности потока и, соответственно, вибрации в активной зоне PWR-900 будет ниже. Данные по поперечным перетечкам теплоносителя в реакторе и колонке стенда отсутствуют, сравнение по этому параметру не проводилось.

В ходе работы решались следующие задачи:

 определение ускорений середин пролетов твэлов при гидродинамически возбуждаемой вибрации;

определение влияния теплогидравлических параметров теплоносителя (температуры, расхода, динамического давления) на вибрационный отклик твэлов;

 определение влияния длин пролетов на уровень вибрации.

Исследования проведены на стенде горячей обкатки В-1000, состоящего из основного циркуляционного контура и параллельно подключенного контура с пульсатором. Расход теплоносителя по каждой из ветвей регулируется с помощью дисковых затворов. В колонку теплоноситель подается с противоположных сторон по двум трубопроводам.

В ходе испытаний измерялись гидродинамическое воздействие со стороны теплоносителя, характеризуемое пульсациями давления, и динамический отклик ТВС-КВАДРАТ в виде ускорений твэлов в серединах пролетов между ДР. Также в испытаниях контролировались технологические параметры: температура, давление и расход теплоносителя через колонку.

Источником вибрации твэлов в продольном потоке теплоносителя являлись гидродинамические нестабильности потока, создаваемые циркуляционным насосом, акустическими колебаниями и турбулентностью потока, а также поперечными перетечками.

СКЗ шума измерительных каналов ускорения составляют около одной трети от СКЗ измеренных сигналов. При определении запасов по ускорению до критического уровня наличие в измеренных сигналах дополнительного шума пошло в запас консерватизма. На рисунке 2 приведены частотные спектры ускорений твэлов. Возбуждение вибрации твэлов потоком теплоносителя в пролетах 394 мм и 522 мм происходит на частотах, близких к собственным, и наблюдается в диапазонах от 80 до 90 и от 45 до 60 Гц соответственно. Собственные частоты этих пролетов на воздухе составили в среднем соответственно 83 и 36 Гц. Твэлы в пролете 216 мм имеют среднюю собственную частоту 281 Гц, вследствие чего в исследованном диапазоне частот от 7 до 200 Гц резонансных колебаний в этом пролете не наблюдается.

Температурные зависимости СКЗ виброускорений твэлов приведены на рисунке 3. Как следует из рисунка, ярко выраженной зависимости СКЗ ускорений от температуры не наблюдается даже несмотря на то, что при высоких температурах в пролетах длиной 394 и 522 мм начинают возбуждаться резонансные колебания.

Измерения вибрации проведены при температуре 290 °С, статическом давлении в контуре 15,7 МПа и расходах теплоносителя через ТВС-КВАДРАТ (450±20) и (500±20) м<sup>3</sup>/ч. Варьирование величины расхода и изменение схемы циркуляции не вызвало существенного изменения пульсаций давления в колонке. СКЗ динамического давления изменялось случайным образом в пределах ± 40 % от среднего значения.

Как свидетельствуют результаты измерений динамического давления в районе стенки колонки в ее нижней части и виброускорений твэлов, корреляция между этими параметрами отсутствует (рисунок 4). Источником вибрации твэлов, по всей видимости, являются локальные возмущения потока и/или поперечные перетечки теплоносителя, не регистрируемые датчиками динамического давления, установленными на стенке колонки.

При увеличении расхода от 250 до 500 м<sup>3</sup>/ч наблюдается повышение СКЗ виброускорения на величину от 17 до 41 % (рисунок 5). Вместе с тем, довольно большой разброс виброускорений при одинаковых расходах не позволяет



*Puc.2.* Частотные спектры ускорений твэлов при 290 °С и Q=500 м<sup>3</sup>/ч



*Рис.3.* Зависимость СКЗ ускорений твэлов от температуры



Рис. 4. Зависимость СКЗ ускорения от динамического давления



Рис. 5. Зависимость СКЗ ускорения от расхода

достаточно корректно аппроксимировать полученные зависимости по линейному закону.

По итогам первого этапа испытаний полномасштабного макета ТВС-КВАДРАТ были определены уровни вибрации твэлов при теплогидравлических параметрах теплоносителя близких к штатным для реактора PWR, а также влияние конструкционных и технологических факторов на уровень вибрации.

#### Исследования фреттинг-коррозии моделей твэлов ТВС-КВАДРАТ в условиях штатного водно-химического режима

Задачами исследований являлись:

 определение влияния амплитуды, частоты колебаний твэла и величины зазора между оболочкой и ячейкой ДР на глубину износа оболочек твэлов при штатных параметрах теплоносителя;

 оценка пороговой величины виброперемещения середины пролета в зависимости от частоты колебаний твэла, свыше которой развивается виброизнос оболочки.

Исследования проводились на участке стенда коррозионных испытаний. Основными элементами участка являются: участок гидравлического контура, модели твэлов, система вибрационного нагружения и система измерения вибрации Схема модели представлена на рисунке 6.

Система вибрационного нагружения состоит из восьми бесконтактных электромагнитных вибраторов, комплекта управляющей аппаратуры и охлаждающих вентиляторов. Каждый вибратор представляет собой две катушки, намотанные на Ш-образные сердечники, установленные внутри корпуса вибратора. Вибратор крепится на корпусной трубе модели в середине центрального пролета. Катушки при этом расположены с противоположных сторон корпусной трубы. Внутри твэла напротив катушек установлен якорь из магнитомягкого материала.

Управляющая аппаратура осуществляет электропитание катушек вибраторов импульсным током. Ток, пропускаемый через катушки, создает магнитное поле, взаимодействующее с якорем внутри твэла. Поочередное пропускание тока через катушки создает знакопеременную силу, действующую на якорь. Параметры вибрации твэла подбираются путем регулировки частоты, амплитуды и формы импульсов тока питания.

Ресурсные испытания моделей проводились при циркуляции воды через модели твэлов с поддержанием параметров, близких к штатным для реактора PWR. Испытания планировались из двух этапов продолжительностью по 750 ч. В связи с износом образцов и дальнейшей разгерметизацией моделей длительность первого этапа была сокращена и составила 127 ч.



Рис. 6. Схема модели

вход теплоносителя, 2 - выход теплоносителя
 дистанционирующие решетки, 4 - модель твэла,
 электромагнитный вибратор, 6 - якорь.

Для исследования процессов фреттингизноса частотный интервал до 200 Гц был разбит на четыре диапазона: 7-15 Гц, 15-35 Гц, 35-60 Гц, 60-200 Гц. Первые два диапазона содержат частоты акустической стоячей волны и оборотную частоту циркуляционного насоса. Последние два диапазона содержат собственные частоты пролетов 394 мм и 522 мм (второй и третий пролеты снизу соответственно). Широкополосная вибрация в указанных выше диапазонах была заменена виброэквивалентом на фиксированных частотах из этих диапазонов. Были выбраны частоты: 10 Гц (близкая к частоте стоячей акустической волны), 25 Гц (оборотная частота циркуляционного насоса), 45 Гц (собственная частота пролета 522 мм), 80 Гц (собственная частота пролета 394 мм).

На первом этапе в число варьируемых параметров входило расстояние между пуклевками, однако зависимости от данного фактора обнаружено не было и на втором этапе расстояние было задано в одном диапазоне для всех моделей. По результатам испытаний для каждого сочетания «частота-амплитуда» определены средние по всем узлам контакта скорости износа (таблица 1). Средняя скорость износа для частоты 10 Гц и перемещения 500 мкм вычислена с допущением, что износ в местах контакта, выгнутых наружу был не меньше чем в местах контакта, выгнутых внутрь. Значения средних скоростей износа для образцов твэлов потерявших устойчивость представляют из себя оценку снизу, так как невозможно точно определить момент в который произошла потеря устойчивости и реальные скорости износа могут быть выше.

В таблице 2 представлено сравнение скоростей износа в зависимости от величины начального люфта ячейки ДР.

Скорости износа при величине СКЗ перемещения 500 мкм получены в условиях ката-строфического износа при контакте с острой кромкой изношенной ячейки, что не позволяет корректно использовать их для оценки влияния изначального зазора на скорость износа. Незначительное отличие

таблица 1

СКЗ перемещений, мм	СКЗ ускорения, м/с²	Частота колебаний, Гц	Длительность исптытаний, ч	Средняя (максимальная) глубина износа по всем узлам контакта, мкм	Средняя скорость износа, мкм/ч
0,01	2,5	80	750	0	0
0,025	0,1	10	750	0	0
0,025	0,6	25	750	0	0
0,025	2,0	45	750	0	0
0,025	6,3	80	750	0	0
0,05	0,2	10	750	180 (326)	0,24
0,05	1,2	25	750	0	0
0,05	4,0	45	750	0	0
0,1	0,4	10	127	52 (238)	0,41
0,1	2,5	25	127	141 (290)	1,19
0,5	2,0	10	127	208 (323)	1,64
0,5	12,3	25	127	244 (306)	1,92

Средние значения глубин и скоростей износа образцов оболочек

#### таблица 2

#### Скорости износа при различных начальных люфтах ячейки ДР

Частота, Гц – СКЗ перемещения, мкм	10 - 100	10 - 500	25 - 500
Скорость износа при величине начального люфта от 0 до 5 мкм, мкм/ч	0,43	1,88	1,85
Скорость износа при величине начального люфта от 5 до 10 мкм, мкм/ч	0,39	2,06	1,99
Соотношение скоростей износа	0,90	1,09	1,07

скоростей износа на моделях с параметрами 10 Гц – 100 мкм не выявляет влияния исходного зазора на скорость износа. Даже с учетом узлов с амплитудой 500 мкм, зависимость от начального зазора не прослеживается.

На рисунке 7 представлена зависимость средней скорости износа от СКЗ перемещения для частот 10 Гц и 25 Гц. По графику видно, что при СКЗ перемещений менее 25 мкм износа образцов нет. При СКЗ перемещений более 100 мкм находится область 100 % износа. В диапазоне от 25 мкм до 100 мкм находится переходная область.

На рисунке 8 представлена зависимость средней скорости износа от СКЗ ускорения в середине пролета.

Для теоретического описания процессов износа широко используется теория Арчарда [3,4], согласно которой скорость объемного износа описывается уравнением:

$$W = K \cdot \frac{F_N \cdot V_{\rm up}}{H_\nu} \tag{1}$$

где: *W* – скорость объемного износа;

К-коэффициент износа;

 $F_{N}$  – нормальная сила;

 $V_{_{TP}}^{N}$  – скорость в узле трения;

*H*<sub>v</sub> – твердость по Бриннелю или Виккерсу более мягкого материала пары.

Скорость износа, исходя из (1), пропорциональна нормальной силе в узле трения и скорости трубки в узле трения. Допустим, что нормальная сила в дистанционирующих решетках пропорциональна перемещению в середине пролета и обратно пропорциональна кубу длины пролета, а скорость в узле трения примем пропорциональной произведению перемещения в середине пролета на частоту.

Так как в данной работе исследуются равные пролеты, скорость износа пропорциональна комплексу  $x^2 f$ , где x – амплитуда перемещения середины пролета; f – амплитуда скорости в середине пролета.

В рисунке 9 представлена зависимость средней скорости износа от комплекса  $x^2 f$ . Область неопределенности по наличию износа располагается в значениях комплекса  $x^2 f$  от 0,016 до 0,25, что существенно шире, чем при оценке через величину перемещений.

Из приведенных выше зависимостей (рисунки 6-8) видно, что переходная область имеет наименьшую ширину на диаграмме «скорость износа – перемещение».

Прослеживается зависимость скорости износа от комплекса  $x^2 f$ , однако переходная область при оценке по комплексу существенно шире, чем при оценке по величине перемещений. С ростом амплитуды ускорения середины пролета монотонного роста скорости износа не наблюдается.

Таким образом, из исследованных факторов наиболее влияющим на процесс изнашивания является виброперемещение середины пролета твэла, а влияющим в наименьшей степени - величина начального люфта твэла



*Рис.* 7. Зависимость скорости износа от СКЗ перемещения



*Рис. 8.* Зависимость скорости износа от СКЗ ускорения



*Рис. 9.* Зависимость скорости износа от комплекса *x*<sup>2</sup>*f* 

в узле контакта с ДР в диапазоне до 0,1 мм и ускорение середины пролета.

На основе значений перемещений середин пролетов моделей, на которых отсутствовал износ, построена граница области отсутствия износа. Принимая во внимание факт, что при испытаниях макета ТВС-КВАДРАТ на однокассетном стенде горячей обкатки колебания носили случайный характер и амплитудные значения перемещений отличаются от среднеквадратичных в 3,5 раза, а при испытаниях моделей возбуждение вибрации шло по синусоидальному закону и амплитудные значения отличаются от среднеквадратичных в 1,41 раза, сравнение уровней перемещения проведено как по среднеквадратичным значениям, так и по амплитудным.

Колебания твэлов (в пролетах АФР-ДР1 (394 мм) и ДР1-ДР2 (522 мм)), вызванные потоком теплоносителя, происходят на частотах, близких к собственным, и наблюдаются в диапазонах частот от 80 до 90 и от 45 до 60 Гц соответственно. В этих диапазонах соотношение сигнал/шум является приемлемым и позволяет корректно оценить уровень вибрации твэлов. В остальной части спектра уровень шума сопоставим с уровнем измеренного сигнала. В связи с этим кривая уровня вибраций на однокассетном стенде горячей обкатки на частотах ниже 20 Гц принята консервативно по интегральному уровню перемещений (СКЗ временного сигнала во все частотном диапазоне), а на частотах 45 Гц и 80 Гц приведена к частоте, так как основной вклад в интегральный уровень перемещений вносят шумы на низких частотах.

На рисунках 10-11 представлены граница области отсутствия износа и уровень вибраций твэлов макета ТВС-КВАДРАТ на однокассетном стенде горячей обкатки в среднеквадратичных и амплитудных значениях.

В диапазонах частот 35-60 Гц и 60-200 Гц запас по уровню вибрации твэлов макета ТВС-КВАДРАТ на однокассетном стенде горячей обкатки до границы области отсутствия износа составляет 1,5 и 4,6 раза соответственно.

Для обоснования вибропрочности ТВС-КВАДРАТ в диапазоне менее 35 Гц необходимо уточнение данных об уровне гидродинамически возбуждаемой вибрации твэлов в этом диапазоне. Данная цель может быть достигнута путем применения измерительных каналов с уровнем шума порядка 0,01 м/с<sup>2</sup>. По имеющемуся опыту измерений вибрации



### *Рис. 10.* Диаграмма уровня вибраций твэлов и границы отсутствия износа (по СКЗ)



Рис. 11. Диаграмма уровня вибраций твэлов и границы отсутствия износа (по амплитудным значениям)

снижение уровня шума может быть достигнуто за счет применения пьезоэлектрических акселерометров.

#### Заключение

В рамках первого этапа работ по обоснованию вибропрочности выполнены исследования вибрации полномасштабного макета ТВС-КВАДРАТ в потоке теплоносителя с теплогидравлическими параметрами, близкими к параметрам нормальной эксплуатации реактора PWR.

Установлено, что вибрация твэлов ТВС-КВАДРАТ в потоке теплоносителя возбуждается в виде широкополосного шума, на детерминированных частотах, связанных с работой ГЦН (оборотной и кратных ей частотах), и на частотах, близких к собственным частотам пролетов твэлов.

Эксплуатационным фактором, влияющим на уровень вибрации твэлов, является расход теплоносителя. Влияния температуры, а также динамического давления теплоносителя, измеренного в районе стенок колонки и трубопроводов, не обнаружено.

Конструкционным фактором, влияющим на уровень вибрации твэлов, является длина пролета между ДР. В пролете длиной 216 мм СКЗ ускорений твэлов в среднем в 1,5 раза ниже, чем в пролетах длиной 394 и 522 мм.

В рамках второго этапа работ по обоснованию вибропрочности разработана методика испытаний и получены экспериментальных данные, необходимые для верификации и уточнения математической модели фреттингкоррозии оболочек твэлов в контакте с ДР.

В диапазоне свыше 35 Гц запас по уровню виброперемещений твэлов макета ТВС-КВАДРАТ на стенде ГО В-1000 до границы области отсутствия износа составляет минимум 1,5 раза.

Для обоснования вибропрочности твэлов к фреттинг-коррозии на частотах менее 35 Гц необходимо уточнение уровней вибрации твэлов полномасштабного макета ТВС-КВАДРАТ в потоке теплоносителя на однокассетном стенде горячей обкатки с использованием пьезоэлектрических внутритвэльных акселерометров.

#### Обозначения и сокращения

- АДФ антидебризный фильтр
- **АВР** антивибрационная решетка

**АФР** - антифреттинговая дистанционирующая решетка

- ВВЭР водо-водяной энергетический реактор
- ГО горячая обкатка
- ГЦН главный циркуляционный насос
- **ДР** дистанционирующая решетка
- СКЗ среднеквадратичное значение
- **ТВС** тепловыделяющая сборка

**ТВС-КВАДРАТ-** тепловыделяющая сборка реактора PWR

твэл - тепловыделяющий элемент

**PWR** - Pressurized Water Reactor (реактор с водой под давлением)

- а ускорение, д
- А амплитуда ускорения, g

- среднеквадратичное значение ускорения, g
   частота, Гц
  - ускорение свободного падения, 9,81 м/c2
  - коэффициент преобразования, B/g
- динамическое давление, Па
- среднеквадратичное значение динами-

ческого давления, Па

- **Q** расход, м3/ч
- t время, с

Ã

f

g K

 $\mathbf{P}'$ 

 $\widetilde{\mathbf{P}}'$ 

Т

- температура, °С

#### Список литературы

1. Dangouleme D., Inozemtsev V., Kamimura K., Killeen J., Kucuk A., Novikov V., Onufriev V., Tayal M. Preliminary results of the IAEA review on fuel failures in water cooled reactors.// Proceedings of Top Fuel 2009, Paris, France, September 6-10, 2009.

2. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смаз-ка) // «Эко-Пресс», 2010, с. 454-461.

3. F. Kreith Ed, (1998) CRC Handbook of Mechanical Engineering // CRC Press, 1998, p. 3-129.

4. Frick T.M., Sobek T.E. and Reavis J.R. Overview on the Development and Implementation of Methodologies to Compute Vibration and Wear of Steam Generator Tubes / Symposium on Flow-Induced Vibrations: Vol. 3 Vibration in Heat Exchangers // ASME Special Publication, 1984, p. 149-161.

Контактная информация -

Егоров Юрий Владимирович, инженер - конструктор, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», тел.: +7(915)286-20-32, e-mail:makarov@grpress.podolsk.ru

Статья поступила в редакцию 16.02.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 74 – 81.

### ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТНЫХ АВАРИЯХ

#### В.В. Абрамов, к.т.н.; В.В. Евдокименко; Л.А. Лякишев; М.А. Новгради, к.т.н.; П.Г. Петкевич, к.т.н.

(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

В статье представлены методика и некоторые результаты динамического анализа деформирования транспортно-технологического оборудования при проектных авариях, связанных с падениями тяжелых предметов. Для анализа применяется технология трехмерного моделирования и программный комплекс ANSYS LS-DYNA. Использованные элементы и методы решения верифицированы путем решения ряда тестовых задач. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании ядерной безопасности.

**Ключевые слова:** падение тяжелых предметов, тепловыделяющая сборка, транспортно-технологическое оборудование.

**DYNAMIC ANALYSIS OF FUEL HANDLING EQUIPMENT DEFORMATION AT DESIGN BASIS ACCIDENTS** / V.V. ABRAMOV, DSC (ENG.); V.V. EVDOKIMENKO; L.A. LYAKISHEV; **M.A. NOVGRADY, DSC (ENG.); P.G. PETKEVICH, DSC (ENG.)** // The present article contains methodology and some numerical results of dynamic analysis of deformation of fuel handling equipment at design basis accidents pertained to dropping heavy objects. A number of accidents with nuclear fuel handling equipment were analyzed using 3D modeling technique by means of ANSYS LS-DYNA software. The developed approach can be applied to calculate final and intermediate fuel configurations during the accident, which are the essential data for the nuclear fuel handling equipment safety analysis.

Key words: drop of heavy objects, fuel assembly, fuel handling equipment.

#### Введение

В сложившейся практике обоснования ядерной безопасности при обращении с топливом на АЭС определяются неблагоприятные конфигурации топлива (изменение шага между твэлами или ТВС), способные привести к достижению критичности.

В соответствии с правилами безопасности НП-061-05 при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии исходными событиями проектных аварий могут быть:

 падение предметов, которые могут изменить шаг размещения ТВС и твэлов, нарушить целостность оболочек твэлов и ТВС;

 падение отдельных ТВС, ВТУК, пеналов и чехлов с ОТВС при транспортно-технологических операциях. Для динамического анализа задач о падениях применяются технология трехмерного моделирования и ПК ANSYS LS-DYNA [1, 2]. Использованные в динамическом анализе элементы и методы решения верифицированы путем решения ряда тестовых задач [3].

При выполнении динамического анализа рассматривается изменение шага размещения ТВС и твэлов, конструкционная целостность и деформированное состояние оборудования.

В качестве критерия разрушения элементов конструкций консервативно принимаются превышение величиной пластической деформации значения относительного удлинения  $A_5^T$ .

Менее консервативно в качестве предельного состояния материала, соответствующего исчерпанию деформационной способности, используется превышение накопленной пластической деформации предельной деформацией разрушения материала при одноосном растяжении

$$\varepsilon_{\text{пред}} = \ln \left( \frac{1}{1 - 0, 01 \cdot Z^T} \right) \tag{1}$$

где –  $Z^{T}$  – относительное сужение при разрыве, %.

Ниже представлены описания расчетных схем и геометрических моделей, а также результаты динамического анализа деформирования различных типов оборудования: чехла транспортного, стеллажа бассейна выдержки и пенала герметичного.

#### Чехол транспортный

Чехол транспортный входит в состав транспортно-технологического оборудования системы перегрузки и представляет собой сварную металлоконструкцию, состоящую из следующих основных частей: основание, обечайка, шестигранные трубы, решетка, крышка. Шестигранные трубы приварены к решеткам, которые являются дистанционирующими элементами. Каждая решётка выполнена из листа с 19 шестигранными отверстиями. Две верхние решетки приварены к обечайке, нижняя решетка приварена к плите основания. В верхние решетки ввернуты четыре шпильки, служащие для крепления крышки чехла. Крышка представляет собой сварную металлоконструкцию, состоящую из листа, головки, обечайки и ребер. Суммарная масса чехла, полностью загруженного ТВС, равна 25800 кг.

Динамический анализ выполняется для следующих вариантов падения:

 в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ - падение чехла в воздухе с высоты 9 м на жесткое основание;

 с учетом реальной высоты транспортировки и геометрических размеров шлюза падение с высоты 27,35 м на специально спроектированное амортизирующее устройство эстакады транспортного шлюза.

Рассматривается удар днищем и крышкой, боковой поверхностью, углом крышки и днища.

Основные задачи динамического анализа:

 определение деформационного состояния (или повреждений) конструктивных элементов чехла в результате падения и анализ возможности выпадения из него ТВС;

 определение возможного в результате исходных событий максимального изменения шага между ТВС в чехле.

При падении транспортного чехла с высоты 9 м на жесткое основание скорость удара составит 13,3 м/с. Кинетическая энергия 2,28·10<sup>6</sup> Дж. При падении с высоты 27,35 м на амортизирующее устройство скорость удара транспортного чехла составит 23,2 м/с. Кинетическая энергия 6,94·10<sup>6</sup> Дж.

При падениях с такими энергиями в конструктивных элементах чехла (особенно непосредственно воспринимающих удар) могут иметь место значительные пластические деформации, а также повреждения самих элементов или сварных соединений.

С точки зрения основных задач динамического анализа конструктивные элементы чехла можно условно разделить на две группы. Например, к первой группе относится нижняя опорная конструкция, которая при падении на днище выполняет роль демпфера и, за счет глубоких пластических деформаций, существенно снижает уровень перегрузок на элементы чехла. Повреждения элементов нижней опорной конструкции не важны с точки зрения задач динамического анализа. Ко второй группе (важной с точки зрения задач динамического анализа) относятся элементы, определяющие конструктивную целостность чехла, которые, в первую очередь, обусловлены прочностью сварных соединений решеток с шестигранными трубами и нижней решетки с плитой основания, а также шпильками крепления крышки.

Для решения задач анализа деформационного состояния (или повреждений) конструктивных элементов чехла, загруженного ТВС, при различных вариантах падения разработана трехмерная конечноэлементная модель, максимально отражающая основные конструктивные особенности чехла. В модель чехла «загружены» 19 ТВС с определением необходимых условий контактов. Твердотельная модель чехла и фрагменты конечно-элементной модели показаны на рисунке 1. При построении модели чехла с ТВС использовались четырехузловые оболочечные элементы SHELL 163 и восьмиузловые конечные элементы сплошной среды SOLID 164.



Рис.1. Модель чехла транспортного а) – твердотельная модель; б) – фрагменты конечно-элементной модели; 1-4 – условные номера решеток

ТВС моделируются конечными элементами SOLID 164. При этом обеспечено соответствие основных геометрических размеров ударяющихся частей (размеры торцов головки и хвостовика, величины зазоров между гранями шестигранников ТВС и стенками труб). Смоделированы также длина ТВС, расстояние от головок ТВС до крышки, а также масса ТВС путем задания соответствующего значения плотности.

Проверка возможности выпадения ТВС из чехла включает анализ пластических деформаций элементов конструкции чехла для определения степени их повреждений, а также возможного повреждения или отрыва крышки вследствие разрушения узлов крепления, с последующим выпадением ТВС из чехла. Четыре шпильки крепления крышки моделируются объемными элементами SOLID 164. По результатам анализа определяются максимальные значения усилий, напряжений и пластических деформаций в шпильках, которые затем используются для анализа прочности узлов крепления крышки.

При выполнении анализов падений чехла под углом угол наклона принимается, исходя из того, чтобы направление вектора силы тяжести проходило через точку касания чехла с основанием.

Конструктивная прочность и несущая способность чехла определяются, в первую очередь, прочностью сварных соединений труб с решетками, а также нижней решетки с плитой основания. Для реалистического анализа картины возможных повреждений при значительных ударных нагрузках выполнено моделирование этих сварных соединений с применением имеющейся в ANSYS LS-DYNA технологии «сварки» (WELD), позволяющей соединить необходимые узлы модели, задав условия разрушения этих соединений на разрыв и на срез. После разрушения связи в узлах они исключаются «из работы» и не препятствуют деформациям ранее связанных узлов. Использованная технология «сварки» верифицирована путем решения тестовых задач.

Условие разрушения соединения задается в виде:

$$\left(\frac{F_n}{S_N}\right)^2 + \left(\frac{F_s}{S_S}\right)^2 \ge 1 \tag{2}$$

где  $F_n$  и  $F_s$  - действующие в соединении усилия растяжения и среза, H;

 $S_N$  и  $S_S$  - допускаемые в соединении усилия растяжения и среза, Н.

В конечно-элементной модели заданы условия контактов для всех элементов конструкции чехла и ТВС, которые могут взаимодействовать при ударе. Контактное взаимодействие с проскальзыванием моделируется с учетом сил трения с коэффициентом трения 0,3. Жесткое основание моделируется недеформируемой плоскостью.

Устройство и размеры (в метрах) амортизирующего устройства в зоне гипотетического падения чехла представляет собой сочетание горизонтальных слоев, как показано на рисунке 2.

Три верхних слоя амортизирующего устройства консервативно моделируются упругим материалом без задания условий разрушения. Свойства материала для всех слоев приняты одинаковыми и составляют:

плотность – 2000 кг/м<sup>3</sup>;



*Рис.2*. Устройство и размеры амортизирующего устройства

#### модуль упругости 1,5·10<sup>10</sup> Па.

Для моделирования песка использована геологическая «САР» - модель, применяемая в ПК LS-DYNA для этих целей [4]. Если принять для песка значение модуля упругости E = 25 МПа, то начальный модуль сдвига G и модуль объемного сжатия K можно вычислить по формулам (3) и (4):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

$$G = \frac{25}{2 \cdot (1+0.25)} = 10 \text{ M}\Pi a$$
(3)

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot v)},$$

$$K = \frac{25}{3 \cdot (1 - 2 \cdot 0, 25)} = 16,7 \text{ MIIa}$$
(4)

Параметры «САР» - модели, использованные при выполнении расчетного динамического анализа, получены в [4] на основе экспериментов по вдавливанию штампа в песок.

Для оценки среднего значения перегрузки чехла при том или ином варианте падения использовалось среднее (интегральное) значение перегрузки моделируемых ТВС без учета их упругих свойств (как жестких тел).

Варианты падения чехла на жесткое основание приведены на рисунке 3. Аналогично выполнены модели для динамического анализа падения чехла на амортизирующее



*Рис.3.* Варианты падения чехла на жесткое основание

устройство. Вместо жесткого основания в этом случае использована модель, выполненная в соответствии с рисунком 2.

На рисунке 4 показаны суммарные перемещения в моменты времени, соответствующие полному торможению для вариантов падения чехла днищем на жесткое основание и на амортизирующее устройство, а также зависимости от времени интегральных коэффициентов перегрузки. Максимальное значение интегрального коэффициента перегрузки (в направлении падения) для случая падения днищем на жесткое основание составляет 94,6 g, для случая падения днищем на амортизирующее устройство – 105,6 g.

По результатам динамического анализа при падении чехла транспортного, загруженного ТВС, днищем на жесткое основание с высоты 9 м и на амортизирующее устройство с высоты 27,35 м максимальные пластические деформации в некоторых элементах нижней опорной конструкции, существенно выше величины относительного удлинения при статическом разрушении. Таким образом, консервативно можно предположить, что возможны повреждения (возникновение макротрещин) опорных ребер в нижней части и локальные повреждения обечайки в нижней части в зонах крепления ребер. Повреждений элементов конструкции остальных не произойдет. Прочность шпилек крепления



*Рис.4.* Коэффициенты перегрузки и суммарные перемещения (в метрах) при падении чехла днищем



Рис.5. Пластические деформации плиты основания, в отн. ед.

крышки обеспечивается. По результатам анализа изменения расстояний между трубами незначительны. Таким образом, структурная целостность чехла при падении днищем для двух рассмотренных вариантов падения сохраняется.

Пластические деформации в плите основания составляют 23,4 % при падении на жесткое основание и 20,6 % при падении на амортизирующее устройство. Пластические деформации приведены на рисунке 5.

На рисунке 6 представлены суммарные перемещения в моменты времени, соответствующие полному торможению для вариантов падения чехла боковой поверхностью на жесткое основание и на амортизирующее устройство, а также зависимости от времени интегральных коэффициентов перегрузки. Максимальное значение интегрального







Рис. 7. Пластические деформации решеток, в отн. ед.



Рис.8. Пластические деформации крышки, в отн. ед.

коэффициента перегрузки (в направлении падения) для случая падения боковой поверхностью на жесткое основание составляет 220,5 g, для случая падения боковой поверхностью на амортизирующее устройство – 226,4 g.

Пластические деформации решеток, показанные на рисунке 7, не превышают 33,7 % при падении на жесткое основание и 34 % при падении на амортизирующее устройство. Условные номера решеток показаны на рисунке 1. Пластические деформации крышки, показанные на рисунке 8, и не превышают 32 % при падении на жесткое основание и 35 % при падении на амортизирующее устройство.

По результатам динамического анализа при падении чехла транспортного, загруженного ТВС, боковой поверхностью максимальные пластические деформации в элементах конструкции чехла меньше величины относительного удлинения при статическом разрушении. Повреждений элементов при падении чехла боковой поверхностью на жесткое основание и на амортизирующее устройство не произойдет. Повреждения элементов крепления крышки и ее отрыва при падении чехла боковой поверхностью на жесткое основание и на амортизатор не произойдет. Зависимости от времени максимальных изменений расстояний между трубами показаны на рисунке 9. Максимальное изменение расстояния не превышает 38 мм. Трубы, образующие компактную группу (касающиеся друг друга), отсутствуют. Структурная целостность чехла при падении чехла боковой поверхностью на жесткое основание и на амортизирующее устройство сохраняется.



Рис.9. Зависимости от времени максимальных изменений расстояний между трубами 1 – в направлении оси I-III чехла; 2 – в направлении оси II-IV чехла

#### Стеллажи бассейна выдержки

Стеллажи БВ предназначены для размещения и последующего хранения в них отработавших ТВС (в том числе и в пеналах герметичных), выгружаемых из реактора при плановых перегрузках или при аварийной

выгрузке активной зоны, а также для временного хранения свежих ТВС перед их загрузкой в реактор. ТТО с ТВС при перегрузке осуществляется с помощью машины перегрузочной под защитным слоем воды, для чего в БВ поддерживается уровень воды, обеспечивающий снижение излучения от ТВС до допустимых величин. Стеллажи БВ состоят из десяти секций. Каждая секция стеллажей БВ для ТВС представляет собой сварную металлоконструкцию, внутри которой расположены шестигранные трубы-ячейки, в верхней и нижней части соединенные между собой направляющими и опорными планками. В каждой секции стеллажей имеются две ячейки под пеналы герметичные. Отработавшие ТВС устанавливаются вертикально в шестигранные трубы-ячейки. Пенал герметичный предназначен для изоляции и хранения в нем ТВС с негерметичными твэлами. Конструкция пенала герметичного описана ниже.

Гидрозатвор представляет собой сварную металлоконструкцию из листов. Он предназначен для разделения объемов БВ, шахты реактора и контейнерного отсека. Гидрозатвор транспортируется полярным краном. При проведении ТТО осуществляется перемещение ТВС, пеналов герметичных с дефектными ТВС в воде над стеллажами БВ и гидрозатвором в воздухе. В таблице 1 приведены массы тяжелых предметов, падения которых рассматриваются при обосновании ТТО. Ударные скорости (при вертикальном падении), вычисленные с учетом замедления при падении в воде, составляют 4-10 м/с.

Некоторые варианты падений показаны на рисунке 10. Кроме вертикальных падений рассмотрены также наклонные падения после удара предмета по торцу секции. Динамический анализ выполняется до момента времени, когда происходит полное торможение падающего предмета, то есть расходуется основная энергия удара.

При падении тяжелых предметов на секцию для ТВС стеллажей БВ удар

Падающий предмет	Масса, кг
ТВС (с ПС СУЗ)	770
Гидрозатвор	1815
Пенал герметичный (с ТВС и водой)	1685

таблица 1



*Рис.10.* Варианты падений тяжелых предметов на секцию стеллажей БВ

воспринимает (в зависимости от габаритов ударяющего предмета) то или иное количество направляющих планок и их узлы крепления, которые передают усилие удара на шестигранные трубы и далее (по направлению удара), на соответствующие аналогичные узлы опорных планок. Затем усилие удара воспринимается нижней плитой секции и опорной конструкцией, а также закладными деталями. Направляющие и опорные планки, попарно соединенные между собой с помощью сварки, опираются выступами на торцы шестигранных труб и соединены с ними штифтами (как показано на рисунке 11 а). Степень деформации или повреждения шестигранных труб (что является основной задачей анализа) во многом зависит от того, какая часть энергии удара будет затрачена на разрушение сварных соединений направляющих и опорных планок между собой (зоны А и Г на рисунке 11 а), штифтовых соединений НП и ОП с шестигранными трубами (зоны В на рисунке 1 а), а также на смятие шестигранных труб



Рис.11. Моделирование секции стеллажей БВ а) – узлы крепления НП и ОП; б) – конечно-элементная модель секции

планками (зоны Б на рисунке 11 а). Для получения реальной картины поведения конструкции в процессе ударного взаимодействия конечно-элементная модель должна учитывать механизмы последовательного разрушения сварных и штифтовых соединений (при потере ими несущей способности) и устранение «из работы» направляющих и опорных планок. Кроме того, необходимо обеспечить контакты НП и ОП с шестигранными трубами, возможный последующий удар падающего предмета непосредственно по шестигранным трубам и их возможный удар по нижней плите секции.

При динамическом анализе необходимо также учитывать подкрепляющее действие верхней и нижней плит секции, которые удерживают ячейки от поперечных смещений. Для реальных оценок амплитуд и длительностей действия динамических усилий, передающихся на закладные детали, необходимо смоделировать опорную конструкцию секции, а также учесть наличие масс ТВС и пеналов в ячейках секции.

При нелинейном упруго-пластическом динамическом анализе использована билинейная модель поведения материала Plastic Kinematic [2] со скоростным упрочнением, которая показала хорошее соответствие результатов при решении верификационных задач для конструкций, выполненных из нержавеющих сталей, при скоростях падения порядка 10-13 м/с. Принятые в динамическом анализе свойства материалов даны в таблице 2.

Твердотельная модель и фрагменты конечно-элементной модели секции стеллажей БВ показана на рисунке 11 б. Массы ТВС и

Физико –	механ	ические
свойства	мате	риалов

Марка материала	A <sup>T</sup> , %	v	р, кг/м <sup>3</sup>	<i>Е<sub>т</sub>,</i> МПа
Сталь 08Х18Н10Т	36	0,3	7850	761
Сталь 04X14T5P2Ф-Ш	10	0,3	7850	1960

пеналов, загруженных в секцию, учитываются с помощью элементов сосредоточенных масс, созданных в узлах нижней плиты по центру каждой ячейки. Разработанные конечно-элементные модели секций стеллажей БВ вместе с падающим тяжелым предметом включают до 120000 элементов типа SHELL 163, SOLID 164 и MASS 166.

Сварные соединения всех НП между собой и периферийных НП с верхней плитой, всех ОП между собой и периферийных ОП с нижней плитой, а также штифтовые соединения труб с НП и ОП, моделируются с использованием технологии «сварки» (WELD), позволяющей соединить необходимые узлы модели, задав условия разрушения этих соединений на разрыв и на срез. Условия разрушения соединений принимаются в соответствии с формулой (2).

Падающая ТВС моделируется конечными элементами SOLID 164 с таким модулем упругости, чтобы обеспечить консерватизм динамического анализа повреждений элементов секции стеллажей БВ. При этом обеспечено соответствие основных геометрических размеров ударяющей части (размеры торца хвостовика). Моделируются также длина и масса ТВС (путем задания соответствующего значения плотности). Окончательная проверка правильности моделирования с точки зрения массы выполняется при решении задачи по значению энергии падающей ТВС.

Упрощенная модель падающего пенала выполнена с учетом реальных размеров и свойств материала основных элементов, влияющих на параметры ударного взаимодействия, в первую очередь торцевой (ударяющей) части. К днищу модели пенала приложены сосредоточенные массы так, чтобы суммарная масса (а, следовательно, и кинетическая энергия) равнялись бы массе пенала, загруженного ТВС с учетом воды. Использованы элементы SOLID 164 и MASS 166. При падении боковой поверхностью пенал консервативно моделируется сплошным стальным цилиндром.

В конечно-элементной модели заданы условия контактов для всех элементов конструкции секции и падающих предметов, которые могут взаимодействовать при ударе. Контактное взаимодействие с проскальзыванием моделируется с учетом сил трения с коэффициентом трения 0,3.

Для оценки изменения шага между ТВС консервативно используются величины сближения (расхождения) шестигранных труб в процессе удара.

Консерватизм принятой методики моделирования и расчетного анализа обеспечивается следующими факторами:

 неучетом затрат энергии на деформацию ТВС, торцы головок которых выступают выше уровня торцов направляющих планок и, следовательно, будут первыми принимать ударную нагрузку в зоне падения тяжелых предметов;

 неучетом затрат энергии на конструкционное демпфирование и демпфирование в материалах, которые при глубоких пластических деформациях могут быть очень существенны;

 использованием заведомо большего модуля упругости падающих предметов и неучетом их пластических деформаций.

По результатам предварительных расчетов получено, что наиболее неблагоприятными (с точки зрения повреждений труб) являются ситуации падения ГЗ в центральную зону секции. Конечно-элементные модели, использованные для динамического анализа падений ГЗ на верхний торец секции стеллажей БВ, показаны на рисунке 10. Для сокращения времени динамического анализа принят минимальный начальный зазор между торцом ГЗ и торцами НП с заданием соответствующей начальной скорости. Кинетическая энергия при этом составляет 8,22·10<sup>4</sup> Дж. Динамические анализы выполняются до моментов времени, за которые происходит удар ГЗ по направляющим планкам и трубам, полное торможение и последующий отскок.

При вертикальном падении ГЗ на секцию стеллажей, возможны повреждения торцов труб, попадающих под удар, в зонах крепления НП и ОП, т.е. на длине, не превышающей 82 мм в верхней части и 55 мм в нижней части. Если исключить эти зоны, то пластические деформации в трубах ниже величины относительного удлинения при статическом разрушении (рисунок 12 а). Максимальное увеличение расстояния между трубами в середине пролета (расхождение) составляет 30,1 мм (рисунок 12 б). Во всех рассмотренных вариантах падений ГЗ на секции стеллажей БВ трубы, образующие компактную группу (касающиеся друг друга), отсутствуют. По результатам анализа пластические деформации в остальных элементах конструкции либо отсутствуют, либо ниже величины относительного удлинения при статическом разрушении. Таким образом, разрушений этих элементов конструкции при вертикальном падении ГЗ не произойдет.

При наклонном падении ГЗ гранью, имеющей размеры 8960×712 мм, на верхний торец секции стеллажей БВ максимальное изменение расстояния между соседними трубами в середине пролета не превышает 1,2 мм. В рассмотренном варианте падений ГЗ на секцию стеллажей БВ трубы, образующие компактную группу (касающиеся друг друга)



### *Рис.12.* Результаты анализа вертикального падения гидрозатвора

а) – пластические деформации труб, в отн.ед.; б) – зависимости от времени изменений расстояний между трубами отсутствуют. По результатам анализа пластические деформации в элементах конструкции либо отсутствуют, либо ниже величины относительного удлинения при статическом разрушении. Повреждений элементов секции при наклонном падении ГЗ не произойдет.

#### Пенал герметичный

Пенал герметичный (далее пенал) относится к основному оборудованию по обращению с топливом в реакторном зале и предназначен, для хранения в нем отработавших TBC с негерметичными твэлами. Пенал представляет собой сварную цилиндрическую конструкцию, состоящую из корпуса с днищем, крышки и пробки, служащими для герметизации внутренней полости пенала. Корпус выполнен в виде цилиндрической обечайки с днищем и головкой. В нижней и верхней части корпуса расположены впускной и выпускной предохранительные клапаны. В пенале размещены твэлы, которые располагаются в шестидесяти трубах. Трубы, Ø 19х1 мм, собраны в шестигранную форму и соединены между собой четырьмя дистанционирующими решетками и одной нижней опорной решеткой. Опорная решетка с помощью уголков нижних приваривается к цилиндрическому хвостовику, который свободно устанавливается на упоры днища пенала. Трубы совместно с хвостовиком образуют трубный пучок. Верхняя дистанционирующая решетка посредством уголков верхних приваривается к корпусу пенала. Общий вид конструкции представлен на рисунке 13.

Динамический анализ проводится для вертикального падения пенала в воде, на нижнюю плиту стеллажей БВ, с высоты 10,67 м. Полная масса пенала, загруженного негерметичными твэлами и заполненного водой, составляет 1100 кг. Материал элементов конструкции пенала – стали марок 08Х18Н10Т и 12Х18Н10Т.

При нелинейном пластическом динамическом анализе использована модель упрочнения Plastic Kinematic [2]. В качестве предельного состояния материала, соответствующего исчерпанию деформационной способности, менее консервативно принято превышение накопленной пластической деформации предельной деформации разрушения материала при одноосном растяжении по формуле (1).



Рис.13. Пенал герметичный

Сварные соединения моделировались с использованием имеющейся в ПК ANSYS LS-DYNA технологии «сварки» (Weld), позволяющей соединить необходимые узлы модели, задав условия разрушения этих соединений на разрыв и на срез. Условия разрушения соединений принимаются в соответствии с формулой (2). В начальный момент времени пенал находится на минимальном расстоянии от опоры. Его скорость в вышеприведенном положении составляет порядка 8 м/с.

Динамический анализ проводится до момента полного торможения элементов пенала. Дальнейшее поведение пенала после указанного момента не рассматривается. В качестве критерия прекращения счета принято полное торможение трубного пучка, т.к. даже после остановки корпуса пенала трубный пучок будет продолжать движение за счет смятия хвостовика, нижних уголков и растяжения верхних уголков.

На рисунке 14 а представлен график зависимости скорости твэла в одной из труб от времени. Можно убедиться, что происходит полное торможение твэла и дальнейшее изменение направления скорости на противоположное в результате отскока пенала.

Также одним из критериев остановки счета может служить прекращение пластического деформирования материалов конструкций, поскольку именно пластические деформации служат критерием разрушения в настоящем динамическом анализе. Анализ показал, что к выбранному моменту окончания времени счета – 0,03 с – накопление пластических деформаций прекращается как для корпуса пенала, так и для трубного пучка.

На рисунке 14 б приведены пластические деформации и деформированное состояние днища пенала после удара. Результаты показывают, что наиболее нагруженной зоной пенала является центральная часть днища. Максимальные пластические деформации в зоне стыка плоской части с выступом днища не превышают предельную деформацию разрушения.

На рисунке 14 в приведены пластические деформации хвостовика и нижних уголков после удара. Как видно из рисунка, стенки хвостовика в значительной степени подвержены изгибу, а также претерпевают пластические деформации. Максимальные деформации хвостовика возникают в местах его установки на упоры пенала. В начале удара происходит смятие стенок хвостовика в области его постановки на упоры пенала. Затем, в результате изгиба нижних уголков, повреждения сварных соединений крепления уголков нижних к решетке опорной и воздействия периферийных труб на торец хвостовика, увеличивается нагрузка на стенки хвостовика, что приводит к их смятию. Максимальные пластические деформации в зоне установки хвостовика на упоры и в зоне контакта с трубами сравнимы или локально могут превышать величину предельной деформации разрушения. Таким образом, в указанных зонах возможно повреждение материала. В остальной его части пластические



*Рис.14.* Результаты расчета а) – зависимость от времени скорости твэла;

б) – пластические деформации в днище, в отн. ед.; в) – пластические деформации хвостовика и уголков, в отн. ед.; г) – пластические деформации труб, в отн. ед.; д) – радиальные перемещения труб, в метрах; е) – зависимость

перегрузки от времени

деформации порядка 27 %. Можно отметить, что повреждения хвостовика не произойдет.

При ударе максимальные пластические деформации труб имеют место в области контакта трубного пучка с торцом хвостовика, как показано на рисунке 14 г. Максимальные пластические деформации не превышают значения 35,1 %, что меньше предельной деформации разрушения. Помимо пластических деформаций имеют место значительные прогибы труб в промежутках между дистанционирующими решетками. Анализ показал, что максимальные перемещения наблюдаются для периферийных труб. Наибольшие сближения труб наблюдаются между опорной и нижней дистанционирующей решетками.

На рисунке 14 д представлено деформированное состояние и радиальные перемещения труб в нижнем пролете в момент их наибольшего сближения. Максимальное остаточное расхождение труб возникает между нижней и последующей дистанционирующими решетками и составляет менее 5 мм.

На рисунке 14 е приведен график зависимости осредненной вертикальной перегрузки, действующей на пенал. Указанная перегрузка приведена к центру масс. Полученная в результате анализа вертикальная перегрузка не превышает 307 g.

В результате анализа установлено, что пластические деформации нижней части корпуса пенала, воспринимающей большую часть энергии удара, достигают 34,7 %, что не превышает величину предельной деформации разрушения.

Пластические деформации труб (за исключением зоны контакта с торцом хвостовика) не выше величины 21,2 %.

Максимальное сближение труб происходит в момент времени 16,3 мс в пролете между опорной и нижней дистанционирующей решетками. В указанный момент времени наибольший прогиб наблюдается для периферийных труб (угловая труба), при этом значение прогиба составляет 14,6 мм. Максимальное изменение шага решетки, в этот же момент времени, составляет минус 9,7 мм (соответствует шагу деформированной решетки 20,3 мм при номинальном значении 30 мм).

Остаточные деформации приводят как к увеличению, так и к уменьшению шага решетки. Максимальное остаточное сближение труб в трубном пучке возникает в нижнем пролете между решеткой опорной и первой дистанционирующей решеткой и не превышает 8,6 мм. Максимальное остаточное расхождение труб возникают между второй и третьей дистанционирующими решетками и составляет менее 5 мм.

Выполненный динамический анализ показывает, что нарушения целостности пенала при его падении на стеллажи БВ не происходит. Также исключается возможность выпадения из него ЯТ.

#### Вывод

ПК ANSYS LS-DYNA позволяет получить расширенную, наглядную и качественную информацию о поведении элементов оборудования, что дает основания для его внедрения в расчетную практику при решении определенного класса задач. В большинстве случаев получить такого рода данные, пользуясь какими-то простыми оценками, представляет весьма сложную задачу или вообще невозможно. Полученные результаты могут также использоваться в качестве исходных данных для анализа ядерной и радиационной безопасности при нештатных ситуациях во время транспортировки топлива.

#### Список сокращений

**БВ** – бассейн выдержки

ВТУК – внутриобъектовый транспортный

упаковочный комплект

ГЗ – гидрозатвор

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии

НП – направляющие планки

ОП – опорные планки

ОТВС – отработавшая тепловыделяющая сборка

ПК – программный комплекс

ПС СУЗ – поглощающий стержень системы

управления и защиты

ТВС – тепловыделяющая сборка

ТТО – транспортно-технологические операции

#### Список литературы

1. LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 971 - LSTC, 2007.

2. LS-DYNA Theory Manual. Version 971 - LSTC, 2006.

3. Petkevich P., Abramov V., Yuremenko V., Piminov V., Makarov V. and Afanasiev A.,

"Simulation of the nuclear fuel assembly drop test with LS-dyna" // Nucl. Eng. and Des., 2014, vol. 269, p. 136-144.

4. Болдырев Г.Г., Муйземнек А.Ю. Численное моделирование оснований при

больших деформациях - НПП «ГЕОТЕК», Пенза, 2013.

Контактная информация -

Абрамов Виктор Владимирович, инженер-конструктор 1 категории, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», тел.: +7(4967) 65-2602, e-mail:EVV@grpress.podolsk.ru

Статья поступила в редакцию 03.03.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 82 – 94.

### АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТИВНОЙ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

#### А.Е. Александров, д.т.н., профессор; А.В. Тюрин

(Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и информатики, 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)

#### М.Н. Киселев; В.А. Пиминов

(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21)

В статье приводится описание вероятностной модели разрушения корпуса реактора РУ с ВВЭР, построенной на основе физико-механической модели, включающей процессы докритического и критического роста трещин. Для моделирования случайных процессов используется метод Монте-Карло. Для реализации процесса имитационного моделирования разработаны специальные программные средства и расчетные алгоритмы, позволяющие существенно сократить расчетное время и обеспечить возможность управления заданной погрешностью. Приведены тесты, оценивающие эффективность разработанных алгоритмов.

**Ключевые слова:** эффективная расчетная модель, модель разрушения корпуса реактора, эффективные алгоритмы, построение вычислительного эксперимента, средства анализа результатов.

**ANALYSIS OF PROBABILITY OF VVER REACTOR VESSEL DESTRUCTION USING EFFECTIVE CALCULATIONAL MODEL / A.E. ALEXANDROV, PROF.; M.N. KISELYOV; V.A. PIMINOV; A.V. TYURIN** // The article represents the description of probabilistic model of VVER RP reactor vessel destruction, constructed on the basis of the physical-and-mechanical model including processes of sub-critical and critical crack growth. For modeling random processes Monte Carlo method is used. For realization of simulating process special software and the calculated algorithms were developed. They enable to reduce essentially computational time and provide possibility of control of the assigned error. The tests estimating efficiency of the developed algorithms are given.

**Key words:** effective calculational model, model of the reactor vessel destruction, effective algorithms, construction of computational experiment, analysis facilities of the results.

#### Введение

При проведении анализа вероятности разрушения корпуса реактора должно быть проведено сопоставление полученных результатов с критерием безопасности – непревышение вероятности разрушения значения 10<sup>-7</sup> на реактор в год [1]. Таким образом, возникает необходимость в разработке расчетной модели для анализа вероятности разрушения корпуса реактора с последующей разработкой на основе этой модели программного средства.

Важной особенностью таких моделей является наличие случайных факторов, участвующих в процессе расчета, т.е. необходимо построить вероятностную модель разрушения исследуемой конструкции. Кроме того, сама модель, при этом, является многоэтапной, включающей этапы анализа напряженно – деформированного состояния для выбранных режимов эксплуатации, оценки распределения размеров и количества дефектов, полученных по данным дефектоскопического контроля, и последующего расчета вероятности разрушения конструкции с учетом возможных механизмов разрушения.

Следует заметить, что расчетных моделей и реализованных на их основе программных средств для решения задач такого класса оказалось немного. Среди отечественных разработок известны только программные средства серии МАВР (МАВР 1, 2, 3 и 4) – разработчик НИЦ «Курчатовский институт».

Из зарубежных разработок выделим следующие программные системы:

 компьютерная программа анализа разрушения корпусов - FAVOR v04.1, разработана для выполнения риск-ориентированного вероятностного анализа целостности конструкции корпуса ядерного реактора в условиях возникновения события переохлаждения;

 программа VISA-2 (Vessel Integrity Simulation Analysis, анализ моделирования целостности сосуда) разработана для оценки вероятности разрушения корпуса ядерного реактора под давлением при наступлении теплового удара;

 программа ОСА-Р, основанная на вероятностной механике разрушения, предназначенная для оценки целостности водоводяных реакторов, подверженных режимам переохлаждения.

Расчеты вероятности разрушения во всех зарубежных программах реализованы методом Монте – Карло. В программах серии МАВР расчеты интеграла вероятности выполнены полиномиальным интерполяционным методом. В связи с этим результаты расчетов, выполненных по зарубежным программам, выдаются в виде распределений значения выходной характеристики (среднее значение и стандартное отклонение). Для программ серии МАВР результаты выдаются в виде точечной оценки.

В настоящей статье приводится описание вероятностной модели разрушения корпуса реактора РУ с ВВЭР, построенной на основе физико-механического моделирования процесса разрушения с использованием метода Монте-Карло. Данная модель реализована в программном средстве «Прогноз\_Р 1.0».

Приведенная многоэтапная вероятностная модель была названа комплексной. Реализация комплексной модели в виде разработанного программного средства – исходной расчетной моделью. Использование разработанной исходной расчетной модели для практических задач привело к существенным затратам машинных ресурсов, включая большие затраты памяти, времени расчета и большие объемы расчетных проектов.

Для сокращения затрат машинных ресурсов были разработаны вычислительные алгоритмы, в основе которых использованы интерполяционные методы, позволяющие управлять выходными расчетными погрешностями и временем расчета. Имея инструментальные программные средства, с использованием разработанных вычислительных алгоритмов для управления выходными расчетными погрешностями можно обеспечить оптимальный выбор параметров расчетной модели в соответствии с заданными значениями машинных ресурсов и заданной точностью. В этом случае можно говорить об оптимальных размерах расчетной модели, отвечающей поставленным целям исследования. Такая оптимальная расчетная модель была названа эффективной расчетной моделью.

Реализация процесса имитационного моделирования в такой постановке требует создания специальной программной среды – специальных инструментальных средств. В состав этих инструментальных средств должны входить:

 набор моделей, имитирующих протекание исследуемого процесса, и средства формирования комплексной модели вычислений в соответствии с заданными требованиями,

 вспомогательные программные средства, объединенные с информационной базой, позволяющие оперативно проводить многовариантные расчеты,

средства анализа полученных результатов.

### Комплексная модель разрушения корпуса реактора

Комплексная модель разрушения корпуса реактора построена на основе возникновения исходных событий, связанных с разрушением отдельных элементов РУ. Физико-механическое моделирование процесса разрушения включает процессы докритического и критического роста трещин в рассматриваемом элементе корпуса реактора. Перед началом эксплуатации в корпусе существуют дефекты, образующиеся в результате технологических операций, которые не удовлетворяют требованиям к качеству металла, но пропущены при проведении контроля металла, либо дефекты, удовлетворяющие требованиям и оставляемые в металле. Существующие дефекты подрастают в процессе эксплуатации. Подросшие дефекты могут стать причиной разрушения, особенно в момент возникновения аварийного режима, связанного с приведением в действие системы аварийного охлаждения зоны (САОЗ). В процессе эксплуатации корпус подвергается температурным и механическим воздействиям, а также нейтронному облучению. В этом случае возникает опасность хрупкого разрушения корпуса.

Для расчета полной вероятности хрупкого разрушения корпуса реактора рассматриваются все расчетные события, включающие все режимы, важные как с точки зрения хрупкого разрушения, так и с точки зрения безопасности АЭС [2].

На рисунке 1 приведена комплексная модель расчета полной вероятности хрупкого разрушения корпуса реактора.

Моделирование процессов в соответствии с описанной схемой проведения расчетов включает следующие этапы:

 Расчет теплового и напряженнодеформированного состояния корпуса реактора для выбранных режимов эксплуатации.
 Расчет проводился во внешней программной системе конечно-элементного анализа. Полученные результаты расчета сохранялись в виде бинарных файлов в информационной базе и конвертировались во внутреннюю структуру программной системы для проведения дальнейших расчетов.

2) Анализ напряженно-деформированного состояния и выделение потенциально опасных зон разрушения в различных конструктивных элементах (КнЭ) корпуса. Выделение потенциально опасных зон разрушения проводилось на основе анализа возможности хрупкого разрушения (максимальные раскрывающие напряжения и минимальные значения температур и характеристик материалов с позиций моделей разрушения). По этим параметрам устанавливалась наиболее опасная зона для каждого конструктивного элемента и анализируемого аварийного режима. В случае необходимости рассматривалось несколько опасных зон, а выбор наиболее опасной определялся на этапе окончательного расчета хрупкого разрушения. Полученные опасные зоны использовались для размещения в них исходных трещин.



Рис.1. Комплексная модель расчета полной вероятности хрупкого разрушения корпуса реактора

3) Формирование эксплуатационной модели. Совокупность следующих друг за другом режимов нормальных условий эксплуатации (НУС), нарушения нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) и аварийных режимов – определяют эксплуатационную модель корпуса реактора. В данной последовательности можно выделить устойчиво повторяющиеся подпоследовательности режимов, в рамках которых можно пренебречь временем их протекания. Такие подпоследовательности были названы циклограммами.

В исходной расчётной схеме циклограмма содержала семь компонентов: шесть для описания компонентов тензора напряжений и один для описания температуры. Каждая циклограмма характеризуется частотой её протекания. Последовательность из циклограмм составляет цепочку режимов для заданного периода эксплуатации.

Вся цепочка разбивается на временные интервалы. Число и величина интервалов определяется задачами исследователя. Как минимум, цепочка должна содержать один временной интервал, включающий весь период эксплуатации. Повторяющиеся друг за другом циклограммы объединяются в группы. Таким образом, всю цепочку можно представить в виде последовательности групп циклограмм с указанием числа повторов циклограммы в группе. Такой подход существенным образом сокращает описание цепочки режимов и упрощает работу с ней.

4) Статистическая обработка дефектов для различных конструктивных элементов и задание исходного распределения дефектов. Случайное распределение дефектов формируется на основе статистического распределения параметров трещин, которое определяется по результатам предварительной статистической обработки данных, полученных в ходе обследования рассматриваемого корпуса реактора. Эти данные можно получить на основе неразрушающего контроля металла, проводимого перед вводом в эксплуатацию и корректировать эти данные в период эксплуатации реакторной установки.

К параметрам, которые являются случайными – статистическими распределениями, относятся:

плотность трещин – число трещин в единице объема,

- глубина трещин,

длина трещин.

При проведении контроля металла известными являются: полное число обнаруженных дефектов в исследуемом объеме и их распределение по размерам для всей исследуемой зоны конструкции. Полученные распределения должны быть откорректированы с учетом их пропуска. В зависимости от последовательности проведения корректировки распределений дефектов были рассмотрены два варианта проведения предварительной статистической обработки:

- метод корректировки распределений,

- метод корректировки групп дефектов.

5) Моделирование распределений заданных случайных параметров.

моделирования случайных Для чисел, распределенных по заданному закону, использовался универсальный способ получения случайных чисел, распределенных в виде произвольного закона распределения. Универсальный способ получения случайных чисел основан на кусочно-линейной аппроксимации заданного распределения. Исходное распределение заменяется двумя массивами данных: интегральной вероятностью и соответствующими значениями исходного случайного параметра. Количество значений вероятности и параметров выбирается исходя из заданной точности аппроксимации. Величины расстояний между соседними значениями вероятности выбираются постоянными, тогда вероятность попадания в любой интервал случайной величины x, генерируемой с помощью датчика случайных чисел, является постоянной.

Номер интервала определялся в соответствии с формулой:

$$m_i = [n \cdot x_i] + 1 \tag{1}$$

где  $x_i$  – генерируемое случайное равномерно распределенное число из интервала (0,1);

*n* – число выбранных интервалов;

 $[n \cdot x_{i}]$  – целая часть произведения двух чисел;

 $m_i$  – номер интервала.

В соответствии с найденным номером интервала определяется абсцисса левой границы интервала параметра  $a_m$  и коэффициент масштабирования  $(a_{m+l} - a_m)$ .

Далее генерируется равномерно распределенное число *x*<sub>*i*+1</sub> и вычисляется случайное число с заданным законом распределения:

$$y_i = a_m + (a_{m+1} - a_m) \cdot x_i$$
 (2)

#### 6) Докритический рост трещин.

Модель докритического роста трещин для детерминированных параметров как в глубину, так и в длину строилась на основе уравнения Пэриса:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{d}\tau} = \frac{\mathrm{A}_0 \cdot \mathrm{C}_0 \cdot \left(\Delta \mathrm{K}\right)^{\mathrm{m}}}{\left(1 - R\right)^{0.25}} \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}\tau} = \frac{\mathrm{A}_{0} \cdot \mathrm{C}_{0} \cdot \left(\Delta \mathrm{K}\right)^{\mathrm{m}}}{\left(1 - R\right)^{0.25}} \tag{4}$$

где  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$  – размах коэффициента интенсивности напряжений в пределах цикла,

А<sub>0</sub>, С<sub>0</sub>, *m*- экспериментальные коэффициенты для данного материала и среды,

R – коэффициент асимметрии цикла. В качестве численного метода для решения уравнения Пэриса был использован неявный метод трапеций с функциональной итерацией [3]. Реализация модели докритического роста для случайных параметров строилась на основе метода Монте-Карло в соответствии с алгоритмом решения уравнения Пэриса с детерминированными параметрами. Для полученных в соответствии с исходными заданными законами распределений случайных параметров численно решалось уравнение Пэриса и получались новые значения длин и глубин трещин, которые статистически обрабатывались и использовались в дальнейших расчетах в виде новых распределений.

#### Критический рост трещин

Модель критического роста трещин построена на основе механизма хрупкого разрушения. Критический рост трещин по механизму хрупкого разрушения возникает в случае, если:

$$K_1(r,\tau) > K_{1C}(\tau) \tag{5}$$

где  $K_1(r, \tau)$  – текущее значение коэффициента интенсивности напряжений в момент времени  $\tau$  и в заданной точке r(x, y, z);

 $K_{IC}(\tau)$  — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН).

Текущее значение для КИН рассчитывалось по формуле:

$$K_1(r,\tau) = Y(a,c) \cdot \sigma_{\text{int}}(r,\tau) \cdot \sqrt{a(\tau)}$$
<sup>(6)</sup>

где Y(a, c) – коэффициент формы в момент для трещины размером а и с определяется согласно [4];

 $\sigma_{int}(r, \tau)$  – приведенное напряжение в момент времени  $\tau$  и в точке r(x, y, z) также определяется согласно [4].

Для описания разброса данных в области хрупкого разрушения была использована статистическая модель в виде трехпараметрического распределения Вейбулла:

$$cp(\tau) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{K_1(\tau) - K_{\min}}{K_0(\tau) - K_{\min}}\right)^4\right] \quad (7)$$

где  $cp(\tau)$  – вероятность разрушения образца;

 $K_0(\tau)$  — параметр масштаба, зависящий от температуры и толщины образца;

 $K_{min} = 20 \text{ M}\Pi a \sqrt{M} - Mинимальное значение вязкости разрушения.}$ 

Условная вероятность хрупкого разрушения для рассматриваемого расчетного события определялась как ее максимальное значение на заданном интервале времени:

$$CPI = \max\left(cpi(\tau)\right) \tag{8}$$

Реализация модели критического роста трещин для случайных параметров строилась на основе метода Монте–Карло. Входящие в уравнение (7) случайные параметры моделировались на основе исходных распределений, в соответствии с универсальным алгоритмом, описанным на этапе 5. Полученные значения вероятности хрупкого разрушения статистически обрабатывались в виде плотности распределения и затем в виде интегральных характеристик.

В разработанном программном средстве предусмотрена возможность задания статистического распределения для исходных данных в области хрупкого разрушения в виде нормального и логнормального законов распределений.

8) Вычисление суммарной вероятности хрупкого разрушения.

Вероятность хрупкого разрушения (отказа) всего корпуса реактора находилась по известным значениям вероятности разрушения для выделенных конструктивных элементов. Следует заметить, что разрушение (отказ) любого конструктивного элемента приводит к разрушению (отказу) всего корпуса. Поэтому безотказная работа корпуса может быть найдена по теореме умножения независимых событий – не отказов каждого из выделенных элементов. Условная вероятность отказа (разрушения) всего корпуса реактора  $P_{fr}(\tau)$  для *i*-го расчетного события найдется из следующего соотношения:

$$P_{fr_{i}}(\tau) = 1 - \prod_{j=1}^{M} \left( 1 - P_{j/fr_{i}} \right)$$
(9)

где  $P_{j_i j_{i_i}}(\tau)$  – условная вероятность отказа (разрушения) *j*-го конструктивного элемента при условии реализации *i*-го расчетного события.

Если известна частота появления расчетного события *fr<sub>i</sub>*, то вероятность отказа (разрушения) всего корпуса может быть найдена следующим образом:

$$P_{\Sigma}(\tau) = \sum_{i=1}^{N} f r_i \cdot P_{\bar{p}_i}(\tau)$$
(10)

Более подробное описание комплексной модели приведено в отчете о верификации программного средства «Прогноз\_Р 1.0».

#### Разработка эффективных алгоритмов

Применение для практических расчетов исходного процесса вычислений в соответствии с приведенной комплексной моделью выявило ряд трудностей, связанных с большими затратами памяти, времени расчета, а также с непосредственным формированием расчетных проектов и с использованием их для проведения вычислительных экспериментов.

С целью оптимизации времени расчета и затрат памяти при сохранении требуемой точности вычислений были определены направления решения следующих задач.

Во-первых, были локализованы выделенные опасные зоны, в пределах которых происходит разрушение. Такая локализация позволила существенно сократить объем геометрии исследуемого элемента на дватри порядка, что в свою очередь позволило повысить скорость переноса проектов между ПЭВМ, а также сократить время на загрузку данных в процессе расчета. Следует также отметить, что проведенная локализация привела к снижению времени поиска конечного элемента, в который попадает характерная точка трещины.

Затем были выделены наиболее затратные части вычислительного процесса, связанные с вычислением значений компонентов тензора напряжений и температуры в базовых точках траектории трещины при реализации моделей докритического и критического роста. Следует заметить, что в исходном варианте расчета эти вычисления значений компонентов тензора напряжений и температуры проводились непосредственно в процессе имитационного моделирования. Для вычисления этих значений вначале определялся конечный элемент, внутри которого находилась исходная точка трещины, а затем вычислялись локальные координаты по заданным исходным глобальным координатам точки трещины. Локальные координаты исходной точки определялись путем решения нелинейной системы уравнений на основе метода Ньютона. Вычисленные значения локальной координаты использовались для вычисления искомых компонентов тензора напряжений и температуры.

В модифицированной расчетной схеме, использующей реализованные алгоритмы, расчет компонентов тензора и температуры был вынесен за пределы имитационного процесса моделирования как отдельный самостоятельный этап, включающий формирование траектории трещины и определение для нее базовых точек интерполяции с помощью метода Ньютона. Выбор базовых точек (задание исходного шага интерполяции) осуществляется в соответствии с характером изменения поля напряжений и температуры, а также с требуемой точностью расчета и исходя из заданных вычислительных ресурсов. Полученный набор базовых точек использовался для построения кусочно-линейных функций и линейной интерполяции компонент тензора напряжений и температуры непосредственно в имитационном процессе вычислений.

Перед проведением вычислительного эксперимента предварительно были вычислены значения раскрывающих напряжений в выбранных базовых точках траектории трещины, используемые для определения коэффициента интенсивности напряжений как для докритического, так и критического роста трещин. Использование раскрывающих напряжений (одна компонента) в качестве базовых точек для интерполяции вместо компонент тензора напряжений (6 компонент) позволило в 3,5 раза сократить объем расчётного проекта. Кроме того, данная операция позволила существенно сократить и время расчета всего проекта. Значение выходной характеристики, как показали тестовые расчеты, приведенные ниже, изменилось не значительно.

При формировании модели эксплуатации стыковка режимов проводилась для каждого базового узла траектории по раскрывающим напряжениям и температуре. Сформированные таким образом циклограммы существенно упрощают работу с цепочкой при моделировании докритического подрастания трещин.

В итоге были разработаны инструментальные средства, позволяющие формировать деревья расчетов для проведения вычислительных экспериментов. Разработанные инструментальные средства позволили управления автоматизировать процессы информационными потоками для многовариантных исходных данных и полученных результатов расчетов, хранящихся в заданной определенным образом структуре каталогов и объединенных специальным конфигурационным файлом, называемым файлом проекта. Расчетный проект создавался отдельно для каждого исследуемого конструктивного элемента корпуса реактора. Директория расчетного проекта содержит две группы поддиректорий (рисунок 2):

 поддиректории с исходными базовыми данными текущего конструктивного элемента (описание геометрии и расчётных эксплуатационных режимов);

 поддиректории, соответствующие этапам реализации заданной вычислительной модели.

Директория проекта включает также файл дерева проекта (PDTF - project data tree file), хранящий информацию:

 об этапах расчёта: названии, порядке, расположении на уровне файловой системы;

о ссылках на исходные базовые данные проекта;

о ссылках на файлы расчётов (на файлы узлов) дерева проекта.

Каждая поддиректория, соответствующая этапу расчетной модели, содержит поддиректории расчётов, а также файл с перечнем расчётов текущего этапа. В свою очередь поддиректория расчёта включает три поддиректории (рисунок 3):

 поддиректорию с описанием исходных данных расчёта;

 поддиректорию с результатами проведения расчёта;

 поддиректорию, предназначенную для дополнительной (как правило, отладочной) информации, формирующейся в процессе работы расчётного модуля.

Также в поддиректорию расчёта включен файл расчёта, содержащий следующие информационные блоки:

 заголовок, информирующий об этапе модели, к которому относится расчёт;



Рис.2. Структура директории проекта



Рис.3. Структура поддиректории этапа модели

 ссылка на расчёт-источник этапа более высокого уровня;

 блок со ссылками на исходные данные и результаты проведения расчёта.

При переходе от исходной расчётной схемы к модифицированной общая структура проекта не изменяется. Изменяется набор и структура файлов с базовыми исходными данными.

Модифицированные расчётные алгоритмы позволили не только сократить размеры проекта почти на четыре порядка, но и существенно уменьшить расчетное время.

## Тестирование разработанного программного средства

проверки правильности работы Для разработанного программного средства «Прогноз Р 1.0» было проведено его сопоставление с ранее аттестованным программным средством МАВР - 2.1. С этой целью были сформированы четыре контрольных примера применительно к расчетам докритического роста трещин и хрупкого разрушения. В качестве случайных параметров принимались следующие: исходное распределение дефектов, температура хрупкости в исходном состоянии, смещение температуры хрупкости, содержание меди, фосфора и никеля в сварных соединениях, допустимое значение коэффициента интенсивности напряжений. Параметры распределения коэффициента интенсивности напряжений принимались зависящими от приведенной температуры. Смещение температуры хрупкости рассматривалось как функция от содержания меди, фосфора и никеля, имеющих случайный закон распределения, и от нейтронного потока. Нейтронный поток принимался постоянным. Проведенные результаты расчетов для всех сформированных и реализованных контрольных примеров показали, что максимальное расхождение в результатах, полученных по обеим программам, составили:

 для вероятностной модели докритического роста - не более 2,64 %;

 для вероятностной модели хрупкого разрушения – не более 16 %.

Более подробное описание проведенных результатов тестирования приведено в отчете о верификации программного средства «Прогноз\_Р 1.0».

### Оценка эффективности используемых расчетных алгоритмов

Для оценки эффективности расчетных алгоритмов были проведены тестовые расчеты, включающие сопоставление по точности расчетов, времени выполнения и объему требуемой памяти. Сопоставление проводилось применительно к исходной расчетной схеме и модифицированной с использованием приведенных выше алгоритмов на основе выбранных тестов.

Тестовый расчетный проект соответствовал наиболее опасному конструктивному элементу в корпусе реактора – сварному соединению № 4 и включал следующие четыре режима: номинальный режим, гидроиспытания на прочность и на плотность и аварийный режим – «Поперечный разрыв Ду 850 горячей нитки ГЦТ». Количество шагов для аварийного режима составило 78 временных моментов. Представленный объем информации для теста был выбран, исходя из возможности получения численных результатов за приемлемое расчетное время, как для исходной схемы, так и для модифицированной.

Для исходной расчетной схемы объем проекта составил 3,7 Гбайт. Следует заметить, что почти 99 % от объема проекта приходится на хранение аварийного режима, а именно на хранение тензора напряжений и температуры по времени для каждого узла конечноэлементной модели геометрии.

Для модифицированной схемы объем проекта может меняться в зависимости от числа выбранных точек интерполяции, что дает возможность управлять выбором числа интерполяционных базовых точек в зависимости от требуемой точности расчета и вычислительных ресурсов. В таблице 1 приведены объемы памяти, отводимой для хранения значений раскрывающих напряжений и температуры в базовых точках вдоль траектории трещины в зависимости от их количества. Там же приводятся данные о времени, затрачиваемом на вычисление значений раскрывающих напряжений и температуры в базовых точках, и погрешности, полученной в результате замены метода Ньютона линейной интерполяцией.

Сопоставление объемов проектов для исходной и модифицированной схем показывает, что даже при максимально используемом числе базовых точек (1001 точек) размеры модифицированной схемы оказываются существенно меньше - в 400 раз.

Для оценки времени расчета исходной и модифицированной схемы были проведены расчеты с разным числом статистических экспериментов. Число экспериментов изменялось от 1,0×10<sup>3</sup> до 1,0×10<sup>6</sup>. Предварительная интерполяция полей раскрывающих напряжений и температуры проводилась для модифицированной схемы в 101 базовой точке вдоль траектории трещины.

Результаты сопоставления математического ожидания для этапа докритического роста представлены в таблице 2. В таблице 3 приведено сопоставление времени, полученного для исходной и модифицированной расчетной схемы, а также эффективность расчета, определяемая как отношение времен расчета по исходной и модифицированной схеме.

Сопоставление приведенных результатов показывает, что эффективность модифицированной схемы при незначительной погрешности (менее 0,0052 %) существенно выше, т.е. время расчета с использованием модифицированной схемы более чем в 800 раз меньше по сравнению с исходной.

таблица 1

1 аварийный режим (78 временных моментов)					
Количество базовых точек вдоль траектории трещины Время расчета, с Объем проекта, кБ Погрешность,					
11	0,1	101	2,80		
101	1	930	7,50×10 <sup>-3</sup>		
1001	14	9216	5,01×10-3		

#### Зависимость объема расчётного проекта от количества базовых точек

#### таблица 2

Результаты докрити	ческого	роста трещин	

Докритический рост трещин						
Количество	Математическое о распределения гл	Погрешность %				
экспериментов	Исходная расчётная схема	Модифицированная расчётная схема	norpellineerb, /u			
1,0×10 <sup>3</sup>	7,13×10-1	7,13×10 <sup>-1</sup>	4,97×10-3			
1,0×10 <sup>4</sup>	8,20×10-1	8,20×10-1	5,00×10-3			
1,0×10 <sup>5</sup>	8,36×10-1	8,36×10-1	5,12×10-3			

#### таблица 3

#### Временные оценки для этапа докритического роста трещин

	Докритический рост трещин						
TC.	Время р						
	количество экспериментов	Исходная расчётная схема	Модифицированная расчётная схема	Эффективность расчета			
	1,0×10 <sup>3</sup>	5233	10	523			
Γ	1,0×10 <sup>4</sup>	88298	100	883			
Γ	1,0×10 <sup>5</sup>	887395	1015	874			

#### Результаты критического роста трещин

Критический рост трещин (78 временных моментов)					
Количество	Условная вероятность	П			
экспериментов	Исходная расчётная схема	Модиф. расчётная схема	погрешность, %		
1,0×10 <sup>3</sup>	3,14×10-5	2,12×10-5	32,40		
1,0×10 <sup>4</sup>	4,97×10-5	4,97×10-5	7,50×10-3		
1,0×10 <sup>5</sup>	6,18×10-5	6,18×10-5	1,32×10-2		
1,0×10 <sup>6</sup>	6,20×10 <sup>-5</sup>	6,19×10-5	1,52×10-2		

#### таблица 5

#### Временные оценки для этапа критического роста трещин

Критический рост трещин (78 временных моментов)					
Количество	Время ра				
экспериментов	Исходная расчётная схема	Модиф. расчётная схема	Эффективность расчета		
1,0×10 <sup>3</sup>	101	0,1	1010		
1,0×104	1077	3	359		
1,0×10 <sup>5</sup>	11359	36	316		
1,0×10 <sup>6</sup>	112818	361	313		

Результаты сопоставления условной вероятности хрупкого разрушения для исходной и модифицированной расчетной схемы, приведенные в таблице 4, и эффективность расчета, приведенная в таблице 5, также показывают существенный выигрыш по времени для модифицированной схемы более чем в 300 раз при незначительной погрешности (менее 0,016 %).

Следует заметить, что с уменьшением числа базовых точек вдоль траектории трещины уменьшается и время расчета, но возрастает погрешность. Это позволяет исследователю варьировать число базовых точек, подбирая необходимое время расчета и величину погрешности при заданных вычислительных ресурсах.

#### Разработанные средства анализа

Разработанные средства анализа основаны на порождении дерева расчетов, каждый из которых включает выделенные этапы в соответствии с заданной структурой организации проведения расчетов. Для формирования дерева расчетов была использована организационная структура, представленная выше на рисунке 1. Каждый узел дерева соответствует заданному этапу расчета для исследуемой имитационной модели, входными данными для которого являются данные с предыдущих этапов, а выходными – результаты, используемые для последующих этапов. Для автоматизации работы с подобным деревом были разработаны программные инструментальные средства в виде набора специализированных утилит, которые позволили автоматизировать процесс формирования таблиц и графиков для выбранных этапов расчета с указанием набора изменяемых параметров и выходной характеристики. Ниже приводятся результаты, полученные с использованием разработанных программных средств.

В качестве исследуемых факторов были выбраны различные законы распределения дефектов – экспоненциальный, логнормальный, нормальный и закон Вейбулла, а также различные временные моменты при эксплуатации. Кроме того, были проведены расчеты по оценке эффективности проведения работ по контролю металла и изменению периода их проведения с четырех лет до шести, что дает возможность использовать разработанные программные средства для оптимизации объемов и периодичности эксплуатационного неразрушающего контроля.

В качестве выходной характеристики для процесса критического роста трещин использовалась величина вероятности хрупкого разрушения наиболее опасного конструктивного элемента – сварного соединения № 4, полученная на разный период эксплуатации. Из условий ограничения объема настоящей работы результаты приводятся только для одного аварийного режима «Разрыв главного циркуляционного трубопровода».

Следует заметить, что величина критического роста трещин определялась с учетом их докритического подрастания, результаты расчетов которых здесь не приводятся.

Результаты расчетов выходной характеристики - вероятности хрупкого разрушения от исследуемых факторов приведены в таблицах 6–8 и на графиках (рисунки 4–6).

таблица б

Сварное соединение №4						
Время эксплуатации, год	Вероятность хрупкого разрушения					
	Экспоненциальный	Логнормальный	Нормальный	Вейбулла		
15	1,55×10-4	1,14×10-4	1,07×10-4	7,51×10 <sup>-5</sup>		
22,5	1,70×10 <sup>-4</sup>	1,26×10-4	1,18×10 <sup>-4</sup>	8,26×10-5		
26,25	1,74×10 <sup>-4</sup>	1,29×10 <sup>-4</sup>	1,21×10 <sup>-4</sup>	8,47×10-5		
30	1,78×10 <sup>-4</sup>	1,32×10-4	1,24×10-4	8,69×10-5		

#### Вероятность хрупкого разрушения при отсутствии КМ

#### таблица 7

#### Вероятность хрупкого разрушения при 4-х летнем периоде КМ

Сварное соединение №4								
Время эксплуатации, год	Вероятность хрупкого разрушения							
	Экспоненциальный	Логнормальный	Нормальный	Вейбулла				
15	8,45×10 <sup>-5</sup>	8,41×10-5	1,07×10-4	7,18×10-5				
22,5	8,46×10 <sup>-5</sup>	8,81×10-5	1,17×10-4	7,84×10-5				
26,25	8,52×10-5	8,91×10 <sup>-5</sup>	1,20×10-4	8,02×10-5				
30	8,53×10-5	9,04×10-5	1,23×10-4	8,18×10-5				

#### таблица 8

#### Вероятность хрупкого разрушения при 6-ти летнем периоде КМ

Сварное соединение №4							
Время эксплуатации, год	Вероятность хрупкого разрушения						
	Экспоненциальный	Логнормальный	Нормальный	Вейбулла			
15	1,02×10 <sup>-4</sup>	9,17×10-5	1,07×10-4	7,28×10-5			
22,5	1,00×10 <sup>-4</sup>	9,43×10-5	1,17×10-4	7,90×10 <sup>-5</sup>			
26,25	9,49×10-5	9,40×10 <sup>-5</sup>	1,20×10-4	8,08×10-5			
30	9,28×10-5	9,38×10-5	1,23×10-4	8,28×10-5			



*Рис.4.* Зависимость среднего значения вероятности хрупкого разрушения от времени для различных законов распределения глубин дефектов при отсутствии контроля металла



Рис.6. Зависимость среднего значения вероятности хрупкого разрушения от времени для различных законов распределения глубин дефектов при 6-ти летнем периоде контроля металла

В таблицах 9–10 представлены результаты процентного увеличения вероятности хрупкого разрушения сварного шва № 4 корпуса реактора в зависимости от увеличенного периода КМ по отношению к 4-х летнему периоду КМ.



Рис. 5. Зависимость среднего значения вероятности хрупкого разрушения от времени для различных законов распределения глубин дефектов при 4-х летнем периоде контроля металла





Сопоставление результатов расчета показывает, что при отсутствии проведения контроля металла (КМ) наибольшее значение вероятности хрупкого разрушения имеет экспоненциальное распределение. Заметим, что все используемые для сравнения распределения получены на одном и том же массиве экспериментальных данных. Все обнаруженные и допущенные к эксплуатации дефекты

таблица 9

Сварное соединение №4							
Время эксплуатации, год	Процент увеличения вероятности хрупкого разрушения, %						
	Экспоненциальный	Логнормальный	Нормальный	Вейбулла			
15	20,56	8,97	0,00	1,49			
22,5	18,18	7,04	0,00	0,78			
26,25	11,49	5,53	0,00	0,77			
30	8,85	3,72	0,00	1,25			

Процент увеличения вероятности хрупкого разрушения при увеличении периода КМ с 4 до 6 лет
Сварное соединение №4						
	Процент увеличения вероятности хрупкого разрушения, %					
Время эксплуатации, год	Экспоненциальный	Логнормальный	Нормальный	Вейбулла		
15	82,82	36,03	0,61	4,65		
22,5	100,31	42,80	0,81	5,36		
26,25	104,22	44,96	0,97	5,72		
30	108,96	46,44	0,99	6,24		

# Процент увеличения вероятности хрупкого разрушения при отсутствии КМ по отношению к 4-х летнему периоду КМ

не превышают допустимого размера, определяемого нормами и правилами эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС. При расчете допустимый размер дефекта был выбран равным 3 мм. Выбранное распределение дефектов определяет прогнозирование их поведения за пределы исходного экспериментального массива. Среди используемых



*Рис.8.* Частота реализации вероятности разрушения для логнормального распределения



*Рис.9.* Частота реализации вероятности разрушения для нормального распределения

распределений наиболее консервативным, с точки зрения вероятности появления дефектов больших размеров, является экспоненциальное, что и наблюдается при сопоставлении данных расчета, представленных на рисунке 4.

При проведении контроля металла все обнаруженные при эксплуатации дефекты, превышающие размеры допустимого, удаляются. Наибольшему изменению, связанному с проведением КМ, подверэкспоненциальное жено распределение, особенно в области больших дефектов, и в меньшей степени нормальное. Этот момент хорошо подтверждается также сопоставлением частотных характеристик вероятности хрупкого разрушения для различных законов распределения, приведенных на рисунках 7-10. Частотная характеристика представляет распределение числа реализаций выходной характеристики - вероятностей хрупкого разрушения, попадающих в заданный интервал изменения выходной характеристики, отнесенных к общему числу



*Рис.10.* Частота реализации вероятности разрушения для распределения Вейбулла

реализаций, в зависимости от значений выходной характеристики. Представленные частотные характеристики приведены в логарифмическом масштабе для различных законов распределения и с разным периодом работ по контролю металла.

### Заключение

В статье приводится описание вероятностной модели разрушения корпуса реактора РУ с ВВЭР, построенной на основе физикомеханической модели возникновения исходных событий. Физико-механическая модель разрушения включает модели докритического и критического роста трещин. Для моделирования случайных процессов использован метод Монте-Карло.

Для реализации процесса имитационного моделирования в предложенной постановке разработаны специальные программные средства и расчетные алгоритмы, позволяющие существенно сократить расчетное время, уменьшить требования к вычислительным ресурсам и обеспечить возможность управления заданной погрешностью вычислений. Приведены тесты, оценивающие эффективность разработанных алгоритмов.

Для автоматизации процесса формирования таблиц и графиков были созданы программные средства в виде набора специализированных утилит. Приведены примеры расчетов, показывающие возможности разработанных программных средств.

Разработанные программные средства аттестованы в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), получен аттестационный паспорт программного средства – регистрационный номер 358 от 17 апреля 2014 года.

### Список литературы

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97 НП-001-97 (ПНАЭ Г-01- 011-97). Москва, 1997.

2. Шарый Н.В., Семишкин В.П., Пиминов В.А., Драгунов Ю.Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР // Москва: ИздАТ, 2004. – 496 с.

3. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. Пер. с англ. // Москва: Мир, 1998. – 575 с.

4. Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы. РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012.

Контактная информация -

Александров Александр Евгеньевич, д.т.н, профессор, тел.: +7(910) 468-24-77, e-mail:femsystem@yandex.ru,

Статья поступила в редакцию 24.02.2015

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып.3 - Обеспечение безопасности, с. 95 – 108.

## СОДЕРЖАНИЕ

## Козлачков А.Н., Быков М.А., Сиряпин В.Н. Применение искусственных нейронных сетей для

исследования надежности аварийной защиты реактора......3

#### Сиряпин В.Н., Шеин В.П., Трибелев А.А., Нерюев В.А., Шестаков И.Н.

Анализ влияния возможных комбинаций зависаний
органов регулирования СУЗ на надежность
выполнения функции аварийной защиты РУ ВВЭР15

#### Подшибякин М.А., Васин В.М., Кирсанов А.В., Гермаш М.М., Стребнев Н.А., Мартынов А.В., Подшибякин А.К.

Вопросы концепции создания системы представления 

#### Увакин М.А., Алехин Г.В., Быков М.А., Зайцев С.И.

Верификация трехмерной модели нейтронной кинетики кода ТРАП-КС по результатам расчетов 

#### Демехин А.П., Увакин М.А., Брюхин В.В., Устинов А.А.

Консервативная методика определения времени возникновения исходного события при маневренном режиме изменения мощности для расчётов аварийных процессов на РУ ВВЭР по коду КОРСАР/ГП......42

#### Николаев А.А.

Обобщение двумерных DDL-схем GQ-метода на	
трехмерные пространственные сетки из произвольных	
гексаэдров	51

#### Скобелев А.Н., Николаев А.А.

Верификация программы PMSNSYS на методических	
задачах Т. Такеды5	9

#### Гришаков А.В., Лушин В.Б.

Обоснование внедрения модернизированного топлива	
на АЭС «ПАКШ»	68

#### Егоров Ю.В., Макаров В.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В., Шарый Н.В.

Экспериментальные исследования вибрации и фреттинг	·-
износа твэлов ТВС-КВАДРАТ.	74

#### Абрамов В.В., Евдокименко В.В., Лякишев Л.А., Новгради М.А., Петкевич П.Г.

Динамический анализ деформирования транспортнотехнологического оборудования при проектных авариях. .82

#### Александров А.Е., Киселев М.Н., Пиминов В.А., Тюрин А.В.

Анализ вероятности разрушения корпуса реактора
ВВЭР с использованием эффективной расчетной
модели

## **CONTENTS**

Kozlachkov A.N., Bykov M.A., Siryapin V.N.
Application of artificial neural networks for scram
renability analyses
Siryapin V.N., Shein V.P., Tribelev A.A., Neryuev V.A., Shestakov I.N.
Analysis of effects of possible combinations of stuck
CPS control rods on reliability of VVER reactor trip
system function
Podshibyakin M.A., Vasin V.M., Kirsanov A.V., Germash M.M., Strebnev N.A., Martynov A.V., Podshibyakin A.K.
Concentual issues on creation of VVER RP safety
parameter display system
Uvakin M.A., Alekhin G.V., Bykov M.A., Zaitsev S.I.
TRAP-KS code package three-dimensional neutron
kinetics model verification by calculation results of
benchmarks with reactivity variations
Demekhin A.P., Uvakin M.A., Brukhin V.V., Ustinov A.A.
Conservative methods for determination of time of initial
event occurrence at maneuvering power modes for
calculation of accident processes at VVER RP as per
code package KORSAR/GP
Nikolaev A.A.
Generalization of two-dimensional DDL-schemes of GQ-
method for three-dimensional arbitrary hexahedral spatial
mesh
Skobelev A.N., Nikolaev A.A.
Verification of Program PMSNSYS by methodical
tests T. Takeda59
Grishakov A.V., Lushin V.B.
Justification of introduction of the modernized fuel
at "Paks" NPP
Faorov VII V Makarov VV Afanasiov A V
Matvienko I.V., Shary N.V.
Experimental studies of vibration and fretting-wear
of FA-KVADRAT fuel rods74
Abramov V.V., Evdokimenko V.V., Lyakishev L.A., Novgrady M.A., Petkevich P.G.
Dynamic analysis of fuel handling equipment
deformation at design basis accidents
Alexandrov A.E., Kiselyov M.N., Piminov V.A.,
Tyurin A.V.
Analysis of probability of VVER reactor vessel
destruction using effective calculational
model

## ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

Серия: Физика ядерных реакторов

## Выпуск 3

Обеспечение безопасности

Издание подготовлено в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Составитель: к.т.н. В.А. Мохов; д.т.н., проф. А.С. Зубченко Ответственные за выпуск: д.т.н., проф. А.С.Зубченко; С.Р.Сорокин; Н.В. Козлачкова Редакционная подготовка: д.т.н., проф. А.С.Зубченко Компьютерная верстка и художественное оформление: Н.В. Козлачкова Перевод: В.О. Афонина

Подписано в печать Бумага офсетная Тираж 200 экз. 31.07.2015 г. Усл. печ. л. 12,6 Заказ №.1957

Формат 60х84 1/8 Уч. изд. л. 13,5

## Издательство АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

142103 Московская область, г. Подольск, ул. Орджоникидзе 21 Тел.: (4967) 69-18-13 E-mail: Kozlachkova\_NV@grpress.podolsk.ru

Отпечатано в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

#### Правила оформления статей (уточненные в соответствии с требованиями ВАК 2008 г. – выделены п/ж шрифтом)

При подготовке статьи в сборник автор должен руководствоваться стандартом «Оригиналы авторские и текстовые издательские» (ОСТ 29.115–88). К авторским оригиналам, передаваемым для издания, предъявляются следующие требования:

1. Экземпляр статьи должен быть первым, отпечатан на одной стороне листа формата А4 шрифтом N 12 через 2 интервала. Статья должна быть составлена в следующем порядке: индекс УДК; заглавие; инициалы и фамилии авторов; место работы каждого автора с почтовым адресом; аннотация (не более 10 строк); ключевые слова – все вышеперечисленное на русском и английском языках; текст; список литературы; рисунки; подрисуночные подписи (на отдельном листе).

2. Статья должна также обязательно предоставляться в виде электронной версии обычным шрифтом N 11 Times New Roman, междустрочный интервал – одинарный, в редакторе Word 97 или более поздних версий. Текст не форматируется, в качестве имени файла используется ФИО первого автора статьи. Кавычки в тексте ставятся при английской раскладке клавиатуры ("...").

3. Содержание статьи должно быть кратким и четким. Исключаются общие рассуждения, известные положения. Не допускается дублирование материала в тексте, таблицах, подрисуночных подписях. Необходимо соблюдать единообразие в написании терминов, наименований физических величин и единиц измерения, условных обозначений, сокращений, символов. Наименования и обозначения единиц физических величин необходимо приводить в системе СИ.

Необходимо обращать внимание на написание прописных и строчных букв: русские и греческие буквы ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\phi$  и т. д.) набираются прямо, а латинские (x, y, z, w и т. д.) – курсивом. Те же требования в обозначениях нужно соблюдать при написании индексов и степеней в формулах. Обозначения матриц и векторов набираются полужирным шрифтом прямо. Формулы, включенные в текст, следует набирать без увеличения интервала между строками, например b/d,  $\exp(x/e)$ .

4. Таблицы нумеруются, каждая таблица должна иметь заголовок. Сокращения в графах таблицы не допускаются. В тексте необходимы ссылки на все таблицы. Каждая таблица печатается на отдельном листе, а в электронном виде представляется отдельным файлом.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть размечены и сразу расшифрованы. Формулы нумеруются арабскими цифрами, номер ставится с правой стороны листа в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении. Формулы выполняются в редакторе Equation 3.0 или MathType при невозможности набора на клавиатуре:

$$\left(x_{n}^{2}, y_{m}^{n}, \sqrt{x}, \int_{0}^{1} x, \frac{1}{y}$$
 и т.д.

Подстрочные и надстрочные индексы вводятся с клавиатуры ( $x_3$ , км<sup>2</sup> и т. д.), греческие буквы вставляются через Меню *Вставка*  $\rightarrow$  *символ*.

6. В печатном виде в тексте статьи **рисунки и фотографии** необходимо располагать по тексту после первого упоминания, толщина линий и размеры обозначений рисунка должны обеспечивать четкость при уменьшении рисунка до рациональных размеров. На рисунках допускается минимальное число обозначений – краткие цифровые (по порядку номеров слева направо или по часовой стрелке) или буквенные обозначения. Все пояснения выносятся в подрисуночные подписи. Внутренние надписи на рисунках набираются шрифтом N 10. Внизу каждого рисунка должны быть приведены его номер и подрисуночная подпись шрифтом N 11. При наличии нескольких различных графиков на одном рисунке каждый из них обозначается русскими буквами а), б), в) и т. д. и расшифровывается.

В электронном виде рисунки представляются отдельными файлами, выполненными в графических редакторах (фотографии – в растровом формате \*tif, \*jpg с разрешением 300 dpi). Рисунки в Word не вставлять, кроме случаев, когда рисунок изначально выполнен в Word. Подрисуночные надписи необходимо предоставить в электронном виде отдельным файлом.

7. Ссылки на литературу в тексте даются по порядку, арабскими цифрами в квадратных скобках. Список литературы составляется в той же последовательности, в которой приводятся ссылки на литературу. Фамилии и инициалы авторов набираются полужирным курсивом.

8. Список литературы следует оформлять в соответствии с Государственным стандартом «Библиографическая ссылка» (ГОСТ Р 7.0.5–2008), в частности, необходимо указать:

a) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов (не менее трех первых), название статьи, название журнала (без кавычек), год, том, выпуск, номер страницы;

б) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, место издания, издательство (без кавычек), год издания;

в) для авторефератов диссертаций – фамилию и инициалы автора, название автореферата диссертации, на соискание какой ученой степени написана диссертация, место и год защиты;

г) для препринтов – фамилии и инициалы авторов, название препринта, наименование издающей организации, шифр и номер, место и год издания;

д) для патентов – фамилии и инициалы авторов, название патента, страну, номер и класс патента, дату и год заявления и опубликования патента;

е) для отчетов – фамилии и инициалы авторов, название отчета, инвентарный N, наименование организации, год выпуска;

ж) для электронных источников – полный электронный адрес (включая дату обращения к источнику), позволяющий обратиться к публикации.

9. В конце текста перед списком литературы указывается контактная информация обо всех авторах статьи: фамилия, имя и отчество (полностью), должность, телефон, e-mail, полное название учреждения и почтовый адрес и по желанию автора – домашний почтовый адрес.



## Основные направления деятельности предприятия















- Реакторные установки с ВВЭР для АЭС
- Усовершенствованные энергетические реакторы для АЭС нового поколения
- Атомные паропроизводящие установки с жидкометаллическим теплоносителем свинец-висмут для АЭС
- Оборудование и трубопроводы для реакторных установок
  АЭС и опытных экспериментальных установок
- Парогенераторы для реакторных установок ВВЭР и реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
- Экспериментально-исследовательская база для отработки конструкторских решений, проверки работоспособности и надежности проектируемых узлов и оборудования энергетических установок, для испытания материалов оборудования и трубопроводов реакторных установок
- Научно-техническое обеспечение и конструкторское сопровождение проектов головных и серийных реакторных установок
- Программные комплексы для расчетного обоснования проектов и безопасности РУ с ВВЭР
- Программные комплексы для тестирования математического обеспечения АСУ ТП
- Информационные и информационно-аналитические системы для сбора, хранения и анализа больших информационных массивов технических данных оборудования и трубопроводов АЭС
- Сотрудничество с зарубежными странами в области атомной науки и техники



Россия, Московская обл., 142103, г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21 Ten.: (495) 502 79 10; (4967) 54 25 16, Факс: (4967) 54 27 33; (4967) 69 97 83 E-mail: grpress@grpress.podolsk.ru http://www.gidropress.podolsk.ru

ISSN 0205-4671. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып. 3, 1-112