# Расчет вероятности повреждаемости перемычек коллектора первого контура парогенератора с использованием программного комплекса «ПРОГНОЗ»

#### Руководитель: О.В. Голубева Автор: М.Н. Киселев

#### 1 Введение

Коллектор парогенератора относится к элементам АЭС, которые являются важными для ее безопасности. Согласно [1] «Разрывы корпусов оборудования и сосудов, изготовление и эксплуатация которых осуществляется в соответствии с самыми высокими требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, в число исходных событий не включаются». Для подтверждения этого должно быть показано, что вероятность разрушения корпуса коллектора не превышает значения 10<sup>-7</sup> на реактор в год. Для решения этой задачи был разработан программный комплекс «ПРОГНОЗ» [2].

Программный комплекс «ПРОГНОЗ» предназначен для расчета вероятности повреждаемости перемычек коллектора парогенератора от механических усталостных повреждений в условиях воздействия водной среды, которое учитывается по [3].

С помощью разработанного программного комплекса был проведен анализ вероятности разрушения коллектора парогенератора блока 4 Калининской АЭС. В частности оценивалась вероятность образования течи Ду≥100. Вероятность образования течи Ду≥100 является важной характеристикой при обосновании безопасности АЭС.

## 2 Описание конструкции

2.1 Коллектор первого контура (рисунок 1) представляет собой толстостенный цилиндр переменных диаметров и толщин, выполненный из стали 10ГН2МФА. Общая высота коллектора составляет 4970 мм, максимальный диаметр цилиндра 1176 мм при максимальной толщине стенки 171 мм. Внутренняя поверхность имеет защитную антикоррозионную наплавку толщиной 8 мм. В центральной цилиндрической части коллектора имеется 10978 отверстий, служащих для заделки концов теплообменных труб. Верхняя часть коллектора имеет фланцевый разъем Ду 500, уплотняемый плоской крышкой. Теплообменная поверхность состоит из 10978 труб 16х1,5 мм из стали 08Х18Н10Т, запрессованных в коллектор методом гидровальцовки, зазор вблизи наружной поверхности коллектора довальцован. Теплообменные трубы выполнены в виде U-образных змеевиков и скомпонованы в теплообменный пучок.



Рисунок 1- Парогенератор ПГВ-1000М

# 3 Исходные данные

#### 3.1 Описание конечно-элементной модели коллектора

3.1.1 Геометрическая модель коллектора теплоносителя первого контура парогенератора сформирована инструментальными средствами конечно-элементной системы ANSYS (рисунок 2).





3.1.2 Выбор конструктивного элемента для анализа процесса трещинообразования связан с тем, что в рамках выделенного геометрического объема развитие трещины не должно выходить за его границы, т.е. достижение трещиной границы конструктивного элемента означает, что размер ее достиг предельно допустимого критического размера. В рассматриваемой конструкции такому требованию удовлетворяет перемычка корпуса коллектора. Следует заметить, что этот элемент использовался при построении полной геометрической модели коллектора как базовый, причем при формировании геометрической модели были

использованы 2 типа перемычек. В свою очередь для перемычки типа 1 было выделено 4 подтипа, а для перемычек типа 2 – 2 подтипа (рисунок 3).



Рисунок 3 – Типы перемычек

3.1.3 С целью обеспечения консервативности расчетов для анализа процесса трещинообразования была выбрана перемычка с максимальным значением интенсивности напряжения для номинального режима. При этом были проанализированы все перемычки коллектора по трем основным направлениям (рисунок 4).



Рисунок 4 – Развертка коллектора

3.1.4 Максимальные интенсивности напряжений были выявлены в перемычке 55\_114 (рисунок 5), которая и была в дальнейшем выбрана для проведения анализа процесса трещинообразования.

|    | 89  | 90  | 91  | 92  | 93  | 94  | 95  | 96   | 97  | 98  | 99  | 100  | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108  | 109 | 110 | 111 | 112  | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 42 | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | -16  | 17  | 16  | 17  | 16  | -17 | 19  | 12  | 33  |
| 43 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | -17 | 16  | 21  | 11  | 33  |
| 44 | 17  | 16  | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | -17 | 16  | -17 | 16  | -17 | 16   | 17  | 16  | -17 | 16   | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 19  | 12  | 33  |
| 45 | 16  | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | -17 | 16  | 21  | 11  | 33  |
| 46 | 17  | 16  | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16  | -17 | 16  | -17 | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 19  | 12  | 33  |
| 47 | 16  | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | -16 | 17   | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | -17 | 16  | 21  | 11  | 33  |
| 48 | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16  | -17 | 19  | 12  | 33  |
| 49 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | -17 | 16  | 12  | 11  | 33  |
| 50 | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | -17 | 16   | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 11  | 12  | 33  |
| 51 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 21  | 11  | 12  | 11  | 33  |
| 52 | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 21  | 11  | 12  | 11  | 12  | 33  |
| 53 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 12   | 11  | 12  | 11  | 12   | 11  | 12  | 11  | 12  | 11  | 12  | 11  | 33  |
| 54 | 33  | -33 | -33 | -33 | -33 | -33 | -33 | - 33 | -33 | 33  | 33  | - 33 | -33 | 33  | 33  | 33  | 33  | 33  | -33 | - 33 | -33 | -33 | -33 | -33  | -33 | -33 | 33  | 33  | 33  | 33  | 33  | 33  |
| 55 |     |     | -33 | -33 |     |     |     |      |     |     | -33 | - 33 |     |     |     |     |     |     | -33 | - 33 |     |     |     |      | 33  | 33  | 33  |     |     |     |     | 33  |
| 56 | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | -16 | 17  | 16   | 17  | -16 | 17  | 16   | 17  | 16  | -17 | -16 | -17 | 16  | 17  | 16   | -17 | -16 | 12  | 11   | -33 | -15 | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| 57 | 16  | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | -17 | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 12  | 11  | - 33 | -15 | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| 58 | 17  | 16  | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | -17 | 16  | -17 | 16  | -17 | 16   | 12  | 11  |     | -15  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| 59 | 16  | -17 | 16  | -17 | -16 | 17  | 16  | -17  | -16 | 17  | -16 | 17   | -16 | -17 | 16  | -17 | 16  | -17 | 16  | 12   | 11  |     | -15 | 10   | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| 60 | 17  | 16  | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | -17 | 16  | -17 | 16  | 12  | 11   | 33  | -15 | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| 61 | 16  | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 12  | 11  | - 33 | -15 | 10  | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| 62 | -17 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16  | 12  | 11  | -33 | -15  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| 63 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | -17 | 16  | 12  | 11  | -33 | -15 | 10   | 10  | 10  | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| 64 | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 12  | 11  | 33  | 15  | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| 65 | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 17  | 16  | 17   | 16  | 12  | 11  | 33  | 15  | 10  | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| 66 | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16  | 17  | 16   | 17  | 16  | 17  | 16   | 12  | 11  | 33  | 15  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |

Рисунок 5 – Перемычка 55\_114, выбранная для анализа начала трещинообразования

# 3.2 Расчетные режимы

3.2.1 Для расчета циклической повреждаемости были использованы наборы расчетных режимов (таблица 3.1), которые объединяются в последовательности (цепочки) режимов (таблица 3.2).

Таблица 3.1

| Перечень | расчетных | режимов |
|----------|-----------|---------|
| 1        | 1         | 1       |

| Номер режима | Наименование режима                              | Количество<br>повторений |
|--------------|--|--------------------------|
| 1            | Незаполненное состояние                          | _                        |
| 2            | Холодное состояние                               | _                        |
| 3            | ГИ первого контура                               | 180                      |
| 4            | ГИ второго контура                               | 180                      |
| 5            | Горячее состояние                                | _                        |
| 6            | Номинальный режим                                | _                        |
| 7            | Пуск из горячего состояния                       | 16417                    |
| 8            | Плановое снижение нагрузки до горячего состояния | 15453                    |
| 9            | Ложное срабатывание АЗ                           | 800                      |
| 10           | Полное обесточивание АЭС                         | 40                       |
| 11           | Мгновенное заклинивание ГЦНА                     | 7                        |
| 12           | Разрыв трубопровода питательной воды             | 23                       |
| 13           | Малая течь                                       | 31                       |
| 14           | Течь из первого контура во второй                | 44                       |
| 15           | Разрыв паропровода ПГ                            | 10                       |
| 16           | Непреднамеренное открытие и непосадка ПК         | 9                        |

Таблица 3.2

| Номер<br>последовательности | Последовательность режимов                    | Количество<br>повторений |
|-----------------------------|---|--------------------------|
| 1                           | 1-2-3-4-5-7-6-8-5-7-6-9-5-7-6-10-5-7-6-13-2-1 | 31                       |
| 2                           | 1-2-3-4-5-7-6-8-5-7-6-9-5-7-6-10-5-7-6-16-2-1 | 9                        |
| 3                           | 1-2-3-4-5-7-6-8-5-7-6-9-5-7-6-11-2-1          | 7                        |
| 4                           | 1-2-3-4-5-7-6-8-5-7-6-9-5-7-6-12-2-1          | 23                       |
| 5                           | 1-2-3-4-5-7-6-8-5-7-6-9-5-7-6-14-2-1          | 44                       |
| 6                           | 1-2-3-4-5-7-6-8-5-7-6-9-5-7-6-15-2-1          | 10                       |
| 7                           | 1-2-3-4-5-7-6-8-5-7-6-9-5-7-6-8-5-2-1         | 56                       |
| 8                           | 6-8-5-7-6-9-5-7-6                             | 620                      |
| 9                           | 6-8-5-7-6                                     | 14597                    |

# 3.3 Материалы

3.3.1 Нормативные требования к механическим свойствам металла коллектора первого контура приведены в таблице 3.3 в соответствии с [4].

Таблица 3.3

| Гарантированные значения механических характеристи | к стали | 10ГН2МФА |
|--|---------|----------|
|--|---------|----------|

| Температура<br>испытаний, °С | Модуль<br>упругости, МПа | Предел<br>текучести, МПа | Предел<br>прочности, МПа | Относительное<br>сужение, % |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 20                           | 2,15.10-5                | 345                      | 540                      | 55                          |
| 350                          | 1,95.10-5                | 295                      | 490                      | 50                          |

3.3.2 Физико – механические свойства для промежуточных температур определялись с помощью линейной интерполяции.

#### 3.4 Компоненты водно-химического режима

3.4.1 Концентрация кислорода в продувочной воде парогенератора принимается равной концентрации кислорода в питательной воде – не более 5 мкг/кг. Допускается в течение не более 7 суток увеличение концентрации кислорода до 50 мкг/кг при работе на мощности  $< 50 \, N_{\text{ном}}$  и до 10 мкг/кг при работе на мощности  $\geq 50 \, N_{\text{ном}}$ . Принимаем частоту таких отклонений – два события за кампанию.

#### 3.5 Напряженное состояние

3.5.1 Расчет температурных полей и напряжений выполнен методом конечных элементов по программе ANSYS Mechanical [5].

### 3.6 Дефектность

3.6.1 На основе информации, базирующейся на анализе протоколов предэксплуатационного контроля и показывающей отсутствие в основном металле перемычек коллекторов дефектов, начальная дефектность коллекторов при расчете вероятности разрушения не рассматривалась.

#### 4 Методика расчетного анализа

#### 4.1 Общие положения

4.1.1 Расчет вероятности повреждаемости и возникновения трещин в перемычках коллектора выполняется с помощью программного комплекса «ПРОГНОЗ» [2]. Расчетный анализ выполняется в следующей последовательности:

- формирование геометрических объектов;
- генерация ячеек и формирование групп ячеек;
- определение приведенных напряжений;
- формирование цепочек режимов;
- формирование расчетных циклов;
- расчет вероятности повреждаемости для расчетной цепочки режимов;
- расчет вероятности образования граничных трещин.

#### 4.2 Формирование геометрических объектов

4.2.1 Анализируемая конструкция может быть сформирована как средствами самого программного комплекса «ПРОГНОЗ», так и построена средствами программной системы конечно-элементного анализа (например, с помощью программного комплекса ANSYS), а затем конвертирована во внутреннюю структуру программного комплекса «ПРОГНОЗ». Аналогично может быть сформирован и конструктивный элемент.

Исходное геометрическое описание анализируемой конструкции представлено в виде конечноэлементной геометрии. Конечное геометрическое описание конструктивного элемента, помимо конечноэлементной геометрии, содержит описание сети ячеек, которые объединены в граничные и внутренние группы.

Сформированный конструктивный элемент представляет собой иерархическую структуру геометрических объектов, которая изображена на рисунке 6.



Рисунок 6 - Структура конечно-элементной геометрической модели

При импорте конечно-элементной геометрической модели из системы конечно-элементного анализа структура фрагментов определяется исходным описанием.

#### 4.3 Генерация ячеек и формирование групп ячеек

4.3.1 Для анализа зарождения трещин конструктивный элемент разбивается на ячейки. Ячейка рассматривается как кубический элемент с заданным ребром. Геометрия ячейки однозначно задается координатами центра и длиной ребра (характерным размером) кубического элемента. Множество ячеек призмы, охватывающей некоторый конструктивный элемент, образует сеть ячеек. Ячейки конструктивного элемента разделяются на граничные ячейки, которые лежат на поверхности конструкции, и внутренние ячейки, которые лежат внутри конструктивного элемента или на тех его поверхностях, которые не

являются поверхностями конструкции, т.е. являются границами смежных конструктивных элементов. Ячейки объединяются в группы ячеек. В отдельную группу ячеек объединяют ячейки, находящиеся в одинаковых условиях при эксплуатации, вероятность зарождения трещин в которых можно считать одинаковой. В соответствии с разделением ячеек на граничные и внутренние выделяются граничные группы и внутренние группы ячеек.

#### 4.4 Определение приведенных напряжений

4.4.1 Расчет приведенных напряжений проводится для каждой группы ячеек. Величины приведенных напряжений определяются в соответствии с [3, 4].

Методом конечных элементов определяется тензор напряжений [4]. Для принятой истории нагружения далее определяются значения главных напряжений.

Наибольшему за всю историю нагружения главному напряжению  $\sigma_1$  в рассматриваемой точке элемента присваивают индекс i, а двум другим при том же моменте времени – индексы j и k  $(\sigma_i \ge \sigma_j \ge \sigma_k)$ ; соответствующие данному моменту времени главные площадки считаются зафиксированными для всей истории нагружения рассматриваемой точки элемента. Для всех других моментов времени главные напряжения условно относятся к зафиксированным площадкам i, j и k следующим образом: значение соответствующего главного напряжения должно быть отнесено к той зафиксированной главной площадке i, j или k, которая наклонена к фактической главной площадке на наименьший угол.

Значения приведенных напряжений  $(\sigma)_{ij}, (\sigma)_{jk}, (\sigma)_{ik}$  определяются для моментов времени  $t_1, t_2, ..., t_r, ...t_m$ , в которых увеличение (уменьшение) абсолютного значения любого из главных напряжений сменяется его уменьшением (увеличением), по формулам:

$$(\sigma)_{ij,r} = \sigma_{i,r} - \sigma_{j,r} \tag{4.1}$$

$$(\sigma)_{jk,r} = \sigma_{j,r} - \sigma_{k,r} \tag{4.2}$$

$$(\sigma)_{ik,r} = \sigma_{i,r} - \sigma_{k,r} \tag{4.3}$$

Здесь и далее индексом г обозначают значения переменных величин в момент времени t<sub>r</sub>.

Для приведенных напряжений  $(\sigma)_{ij}, (\sigma)_{jk}, (\sigma)_{ik}$  получают их функциональные изменения во времени, в виде последовательного набора полуциклов изменения напряжений от момента  $t_1$  до момента  $t_m$ . В каждом полуцикле напряжение должно изменяться монотонно.

Полученные приведенные напряжения обрабатывались для определения условных упругих приведенных напряжений  $(\sigma_F)_{ij}, (\sigma_F)_{jk}, (\sigma_F)_{ik}$ . Каждый график изменения условного упругого приведенного напряжения отличается от графика соответствующего приведенного напряжения за счет изменений, связанных с пластическими деформациями. Учет пластических деформаций выполняется с помощью упроценного упругопластического расчета.

#### 4.5 Формирование цепочек режимов

4.5.1 Выбранный в качестве истории нагружения перечень эксплуатационных режимов объединяется в последовательности (цепочки). Из заданных последовательностей режимов выделяются многократно повторяемые режимы, которые называются циклограммами. Для каждой циклограммы задается число включений ее в последовательность режимов, а для последовательности – число повторений за срок службы. Формирование цепочек режимов состоит в объединении циклограмм отдельных расчетных режимов в результирующие циклограммы, которые представляют собой последовательности значений условных упругих приведенных напряжений по времени, для каждой группы ячеек. Отдельная результирующая циклограмма является повторяемой последовательностью режимов, входящей в цепочку, которая формирует результирующую последовательностью эксплуатационных режимов работы и нагружения. Для каждой группы ячеек из циклограммы необходимо выделить рабочие циклы. Формирование расчетных циклов выполняется путем выделения из трех циклограмм для ( $\sigma_F$ )<sub>ii</sub>, ( $\sigma_F$ )<sub>ik</sub>, наибольшей возможной амплитуды.

#### 4.6 Формирование расчетных циклов

4.6.1 Для формирования расчетных циклов напряжений в соответствии с [3] был использован «метод теней».

В процессе формирования расчетных циклов (полуциклов) предполагается, что каждый из трех графиков условных упругих приведенных напряжений многократно освещается потоком света, лучи которого направлены вдоль горизонтальной оси времени. Освещения являются парными; при первом освещении из каждой пары рассматриваются только возрастающие, а при втором - только убывающие участки, соединяющие соседние локальные максимумы и минимумы. Считается, что свет не проходит сквозь рассматриваемые участки графиков (возрастающие либо убывающие), вследствие чего на каждом графике при каждом освещении образуется вертикальное пятно тени.

Порядок формирования расчетных циклов следующий:

а) выполняется первый этап основного парного освещения: на всех трех графиках освещаются возрастающие участки. Образующиеся на трех графиках пятна тени сравниваются по величине. Если при одном освещении на каком-либо графике образуется два или больше пятен, то в сравнении каждое пятно участвует независимо. Из всех пятен тени, образующихся на трех графиках, выбирается пятно максимального размера. Если несколько пятен имеют одинаковый размер, то выбирается то, у которого верхняя граница расположена выше;

б) по выбранному пятну тени формируется расчетный возрастающий полуцикл напряжений следующим образом: его минимальное и максимальное значения принимаются равными, соответственно, нижней и верхней границам выбранного пятна;

в) на графике, на котором был сформирован этот возрастающий полуцикл, выполняется второй этап основного парного освещения: освещаются убывающие участки. Образующееся при этом пятно тени совпадает с пятном от возрастающих участков и на тех же принципах формирует расчетный убывающий полуцикл.

Сформированные таким образом расчетные возрастающий и убывающий полуциклы имеют одинаковые минимальные и максимальные значения. Такие полуциклы называются парными расчетными полуциклами.

Парные расчетные полуциклы могут быть объединены в один расчетный цикл;

г) после того, как выполнено основное парное освещение и сформированы парные расчетные полуциклы напряжений, графики  $(\sigma_F)_{ij}, (\sigma_F)_{jk}$  и  $(\sigma_F)_{ik}$  должны быть для дальнейшего анализа преобразованы следующим образом:

1) на графике, на котором были сформированы очередные парные расчетные полуциклы, удаляются те участки, тень от которых вошла в выбранные пятна тени для этих полуциклов;

2) на двух остальных графиках части, расположенные в тех же интервалах времени, что и удаленные участки первого графика, подвергаются дополнительному парному освещению. При этом остальные части этих двух графиков игнорируются. На каждом из двух графиков сравниваются пятна тени от возрастающих и убывающих участков. Если эти пятна совпадают полностью или какой-либо своей областью, то части возрастающих и убывающих участков рассматриваемого графика, создавшие эту общую область тени, удаляются. Если совпадающих областей тени образуется несколько, то удаляются только те освещенные участки, размер области тени от которых больше, а при равенстве – у которых область тени размещена выше;

д) процесс формирования циклов (полуциклов) повторяется по а)-г) до тех пор, пока не окажутся удаленными все участки рассматриваемых графиков.

#### 4.7 Расчет вероятности повреждаемости для расчетной цепочки режимов

4.7.1 Повреждаемость для расчетной цепочки режимов в программном комплексе «Прогноз» рассчитывалась согласно [3].

В соответствии с приведенными рекомендациями, которые распространяются на оборудование и трубопроводы из сталей перлитного класса (углеродистых, легированных и легированных хромомолибденованадиевых) и хромоникелевых коррозионно-стойких сталей аустенитного класса с  $R_m^{20} \leq 700$  МПа, работающие при температурах до 350 °C в контакте с водной средой легководных реакторов, основными факторами, влияющими на циклическую прочность углеродистых и низколегированных сталей и их сварных соединений, являются: содержание серы в металле S, температура цикла T, скорость деформации  $\dot{\varepsilon}$  в полуцикле растяжения приведенных напряжений, концентрация кислорода (КО) в водной среде.

Величина повреждаемости от совместного действия механических усталостных повреждений и влияния водной среды определялась по следующей зависимости:

$$\mathbf{a}_{\Sigma} = \frac{1}{[N_0]_{\Sigma}},\tag{4.4}$$

где  $[N_0]_{\Sigma}$  - допустимое число циклов с учетом коэффициента снижения циклической прочности в водной среде  $F_{pn}$  ( $F_{pn} \ge 1$ ), которое определялось согласно [3] из следующей зависимости:

$$(\sigma_{aF}) = \frac{E^{T} e_{c}^{20}}{(4n_{N} \cdot F_{pn} [N_{0}]_{\Sigma})^{m}} + \frac{R_{cF}^{T}}{(4n_{N} [N_{0}]_{\Sigma})^{m} + \frac{1+r}{1-r}},$$
(4.5)

где  $e_c^{20}$  – характеристика пластичности, которая определяется в соответствии с [3] при использовании гарантированных значений  $Z^T = Z^{20}$  (при  $Z^{20} \ge 50$  % следует принять  $Z^{20} = 50$  %).

Значения характеристики прочности  $R_{cF}^{T}$  и характеристики материала  $m_{eF}$  в формуле 4.5 определяются с учетом влияния водной среды по формулам:

$$\mathbf{R}_{cF}^{T} = \mathbf{R}_{m}^{T} (1 + 0.014 \mathbf{Z}_{F}), \qquad (4.6)$$

$$m_{eF} = 0,132 \, lg[2,5(1+0,014Z_F)], \tag{4.7}$$

где

$$Z_{\rm F} = 100 \left\{ 1 - \left[ \exp(2e_{\rm c}^{20}F_{\rm pn}^{-0.5}) \right]^{-1} \right\},\tag{4.8}$$

при использовании гарантированных значений Z<sup>20</sup>;

$$Z_{\rm F} = Z^{20} F_{\rm pn}^{-0.5}, \tag{4.9}$$

при использовании фактических значений Z<sup>20</sup>.

Коэффициент F<sub>pn</sub> для углеродистых сталей определяется по формуле:

$$F_{pn} = \exp(0,912 - 0,101S^*T^*O^*\varepsilon^*), \qquad (4.10)$$

где

$$\begin{split} & S^* = 0,015, \text{ при KO} > 1,0 \text{ мг/кг}; \\ & S^* = S\%, \text{ при KO} \le 1,0 \text{ мг/кг и } 0 < S \le 0,015\%; \\ & S^* = 0,015, \text{ при KO} < 1,0 \text{ мг/кг и } S > 0,015\%; \\ & T^* = 0, \text{ при T} < 150 ^{\circ}\text{C}; \\ & T^* = T - 150, \text{ при 150} < T \le 350 ^{\circ}\text{C} \\ & O^*, \text{ при KO} \le 0,05 \text{ мг/кг}; \\ & O^* = \ln \frac{\text{KO}}{0,04}, \text{ при } 0,05 < \text{KO} \le 0,5 \text{ мг/кг}; \\ & O^* = \ln 12,5, \text{ при KO} > 0,5 \text{ мг/кг}; \\ & \varepsilon^* = 0, \text{ при } \dot{\varepsilon} \ge 1\% \text{ c}^{-1}; \\ & \varepsilon^* = \ln \dot{\varepsilon}, \text{ при } 10^{-3} < \dot{\varepsilon} < 1\% \text{ c}^{-1}. \end{split}$$

Содержание серы S в стали перлитного класса принимается по сертификату или техническим условиям, температура T принимается равной максимальной температуре в полуцикле растяжения на участке изменения приведенных напряжений  $[\sigma_{F_{max}}] - R_{-1}$ , при асимметричном цикле  $([\sigma_{F_{max}}] > [\sigma_{aF}])$  и  $[\sigma_{aF}] - R_{-1}$ , при симметричном, скорость деформаций  $\dot{\varepsilon}$  – равной минимальному

значению в полуцикле растяжения приведенных напряжений на том же участке, что и при определении T, концентрация кислорода KO – равной ее максимальному значению на режимах, определяющих полуцикл растяжения.

Суммирование повреждаемости от совместного действия механических усталостных повреждений и влияния водной среды проводилось в соответствии с принципом линейного суммирования повреждений:

$$a_{\Sigma}^{cy_{M}} = \sum_{i=1}^{I} \frac{N_{i}}{[N_{0i}]_{\Sigma}}$$
(4.11)

причем величина повреждаемости  $a_{\Sigma}^{cym}$  принималась как случайная с нормальным законом распределения. Величина доверительного интервала, обусловленная статистическим разбросом экспериментальных данных, принималась такой же, как и при испытании на усталость стали марки 10ГН2МФА.

При суммировании случайных величин с нормальным законом распределения результатом суммирования является случайная величина, распределенная по нормальному закону, у которой математическое ожидание и дисперсия равны сумме математических ожиданий и дисперсий слагаемых [6]. Таким образом, для каждого момента времени, может быть вычислено распределение плотности вероятности для повреждаемости от механических воздействий, при условии описания всех компонент этих внешних воздействий. В число описания этих компонент должны быть включены все факторы, определяющие накопление повреждений: число циклов, характеристики циклов, включающие амплитуды и коэффициенты асимметрии условных упругих напряжений, механические свойства металла, температурные характеристики режимов нагружения.

Момент начала повреждения ячейки определяется моментом времени, при котором плотность вероятности повреждаемости начинает пересекать значение повреждаемости равное 1 (рисунок 7). Вероятность образования зародыша макротрещины в ячейке, в этом случае, равна величине площади пересечения плотности вероятности повреждаемости и значения повреждаемости равного 1.



Рисунок 7 – Распределение плотности вероятности повреждаемости на текущий момент времени

#### 4.8 Расчет вероятности образования граничных трещин

4.8.1 Трещину на поверхности перемычки, у которой траектория содержит поврежденные граничные ячейки как крайние слева, так и крайние справа, назовем граничной.

4.8.2 Расчет вероятности образования трещин проводился на основе модели замедленного разрушения, связанной с механизмом накопления рассеянных повреждений и развитием трещин за счет слияния рядом стоящих поврежденных ячеек.

Каждая отдельная ячейка характеризуется вероятностью повреждаемости. Таким образом, в качестве исходных данных, необходимых для определения вероятности возникновения трещины, используются распределения вероятностей повреждаемости ячеек. На основе данной информации и определяется на каждом отдельном эксперименте состояние каждой отдельной ячейки (либо повреждена, либо не повреждена).

Вероятность образования граничных трещин определяется для каждого выбранного момента времени. При этом для каждого отдельного момента проводится порядка 10<sup>6</sup> экспериментов.

Суть каждого эксперимента заключается в следующем.

На первом этапе на основе информации о вероятности повреждаемости каждой ячейки составляется матрица повреждаемости. Матрица повреждаемости позволяет помечать поврежденные ячейки и затем объединять соседние поврежденные ячейки в трещины. Если значение матрицы повреждаемости, соответствующее некоторой ячейке, равно 0, то данная ячейка считается неповрежденной. Если значение равно 1, то ячейка считается поврежденной.

Таким образом, суть данного этапа состоит в определении всех повреждённых ячеек торца перемычки. Осуществляется это в сопоставлении для каждой отдельной ячейки случайно сгенерированного числа на интервале [0;1] со значением вероятности повреждаемости этой ячейки.

На втором этапе эксперимента происходит объединение поврежденных ячеек в трещины. Производится это с помощью алгоритма, созданного на основе классического волнового алгоритма [2].

На третьем этапе эксперимента необходимо определить: имеется ли среди найденных граничная трещина.

После проведения всех экспериментов для данного момента времени вычисляется вероятность образования граничных трещин, путём отношения числа экспериментов, в которых граничная трещина образовывалась, к общему числу экспериментов.

Можно выделить следующие периоды процесса зарождения и развития трещин в перемычке коллектора:

 – инкубационный период – протекает от начала эксплуатации до появления первых зародышей макротрещин и характеризуется накоплением повреждаемости в ячейках до значений равных 1. Данный период и определяет скорость роста повреждений;

– период роста трещин – протекает от появления первых зародышей до момента первого образования граничной трещины. Данный период характеризуется тем, что закономерности роста трещин описываются механизмом слияния рядом находящихся поврежденных ячеек. Потенциально поврежденные ячейки – то есть ячейки, вероятности повреждений которых отличны от нуля и единицы, – могут сливаться в трещины различных размеров в зависимости от числа поврежденных ячеек и значения вероятности повреждения самих ячеек. С возрастанием времени число потенциально поврежденных ячеек и их вероятности возрастают;

– период вероятностного образования граничной трещины – протекает от момента образования первой граничной трещины, до момента достижения значения вероятности образования граничной трещины, равного 1. Данный период характеризуется моментом возможного образования хотя бы одной граничной трещины;

 период детерминированного развития трещины - характеризуется тем, что находящиеся на поверхности перемычки ячейки, образующие граничную трещину, повреждены со стопроцентной вероятностью.

#### 5 Результаты расчетного анализа

#### 5.1 Расчет вероятности повреждаемости

5.1.1 Результаты расчетов повреждаемости наиболее нагруженной перемычки 55\_114 коллектора первого контура парогенератора для расчетной цепочки режимов показали, что на конец срока службы (40 лет) ни одна из сформированных групп ячеек не достигает значения повреждаемости равного 1 и не превышает величины 0,40. Поэтому в качестве граничной величины повреждаемости для качественной оценки динамики ее накопления по времени была выбрана повреждаемость равная значению 0,40. Самый ранний момент времени, для которого вероятность накопления повреждаемости до величины 0,40 отличается от нуля, составляет 20 лет. На конец срока службы (40 лет) количество граничных групп, для которых вероятность накопления повреждаемости до величины 31 группу (рисунок 8).



Рисунок 8 – Граничные группы, для которых вероятность накопления повреждаемости до величины 0,40 отличается от нуля на окончательный момент времени

5.1.2 Значения вероятности накопления повреждаемости до величины 0,40 на окончательный момент времени приведены в таблице 5.1.

### Таблица 5.1

|                        | Вероятность накопления |
|------------------------|------------------------|
| Номер граничной группы | повреждаемости до      |
|                        | величины 0,40, %       |
| 0                      | 30,12                  |
| 1                      | 8,38                   |
| 2                      | 23,19                  |
| 3                      | 11,51                  |
| 4                      | 13,36                  |
| 5                      | 6,51                   |
| 6                      | 13,77                  |
| 7                      | 12,20                  |
| 8                      | 9,55                   |
| 9                      | 9,80                   |
| 10                     | 3,32                   |
| 11                     | 5,78                   |
| 12                     | 1,55                   |
| 13                     | 0,99                   |
| 15                     | 3,36                   |
| 16                     | 0,22                   |
| 17                     | 0,31                   |
| 18                     | 0,12                   |
| 19                     | 0,10                   |
| 20                     | 0,27                   |
| 21                     | 1,61                   |
| 22                     | 0,23                   |
| 23                     | 0,19                   |
| 24                     | 0,12                   |
| 25                     | 0,36                   |
| 26                     | 0,24                   |
| 36                     | 0,70                   |
| 51                     | 48,35                  |
| 59                     | 44,81                  |
| 64                     | 42,84                  |

# Значения вероятности накопления повреждаемости до величины 0,40 на окончательный момент времени

5.1.3 На окончательный момент времени количество внутренних групп, для которых вероятность накопления повреждаемости до величины 0,40 отличается от нуля, составило 23 группы. Данные внутренние группы расположены в рядах под граничными группами 0 – 11, 13, 51 (таблица 5.2).

Таблица 5.2

| Номер граничной группы | Номер внутренней группы | Глубина ряда, мм |
|------------------------|-------------------------|------------------|
| 0                      | 0, 1, 2                 | 4                |
| 1                      | 6, 7                    | 3                |
| 2                      | 12, 13                  | 3                |
| 3                      | 18, 19                  | 3                |
| 4                      | 28, 29                  | 3                |
| 5                      | 36                      | 2                |
| 6                      | 45                      | 2                |
| 7                      | 55, 56                  | 3                |
| 8                      | 65, 66                  | 3                |
| 9                      | 72                      | 2                |
| 10                     | 82, 83                  | 3                |
| 11                     | 91                      | 2                |
| 13                     | 110                     | 2                |
| 51                     | 537                     | 2                |

5.1.4 Вероятность накопления повреждаемости до величины 0,40 для внутренних групп не превышает значений вероятности соответствующей граничной группы. Максимальная глубина залегания внутренних групп составляет 4 мм.

5.1.5 Расчет вероятностей повреждаемости для групп ячеек показал, что суммарная повреждаемость на окончательный момент времени (40 лет) даже для наиболее напряженных групп не достигает значения равного 1. Поэтому на окончательный момент времени (40 лет) трещины не образуются.

# 5.2 Расчет вероятности образования граничных трещин при нарушениях водно-химического режима

5.2.1 Расчет вероятностей повреждаемости для групп ячеек показал (п 5.1.5), что граничные трещины в перемычках коллектора первого контура парогенератора на конечный момент времени не образуются, поэтому были проведены четыре серии расчетов с нарушением параметров ВХР, чтобы проанализировать вероятности образования граничных трещин отличные от нулевых. Характеристики основных факторов при нарушениях ВХР для четырех серий расчетов приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3

#### Значения характеристик основных факторов при нарушения ВХР для четырех серий расчетов

| Характеристика основных                                 | Серия расчетов |             |             |             |  |  |  |  |
|---|----------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|
| факторов при нарушении ВХР                              | Серия 1        | Серия 2     | Серия 3     | Серия 4     |  |  |  |  |
| Содержание серы в металле, %                            | 0,015          | 0,015       | 0,015       | 0,015       |  |  |  |  |
| Скорость деформации, $\dot{m{arepsilon}}$ , % с $^{-1}$ | менее 0,001    | менее 0,001 | менее 0,001 | менее 0,001 |  |  |  |  |
| Концентрация кислорода (КО) в водной среде, мг/кг       | более 0,5      | 0,3875      | 0,275       | 0,1625      |  |  |  |  |

5.2.2 Ячейки, для которых вычислялась вероятность зарождения граничной трещины, отмечены на рисунке 9.



Рисунок 9 – ячейки, для которых вычислялась вероятность образования граничной трещины

5.2.3 Результаты для четырех серий расчетов представлены в таблицах 5.4 и 5.5. Вероятности образования граничных трещин представлены на конечный момент времени (40 лет).

# Таблица 5.4

# Результаты расчета вероятностей образования трещин на поверхности перемычки

| 10             | Π                          | _       |                 |                  |         |
|----------------|----------------------------|---------|-----------------|------------------|---------|
| Количество     | Процент повторов           | Верояти | юсть образовани | я граничной треп | цины, % |
| повторов       | циклограммы<br>6-8-5-7-6 с |         |                 |                  |         |
| 6-8-5-7-6 c    | нарушением ВХР             | Серия 1 | Серия 2         | Серия 3          | Серия 4 |
| нарушением ВХР | от общего числа            |         |                 |                  |         |
| 292            | 2%                         | _       | _               | _                | _       |
| 438            | 3%                         | _       | _               | _                | _       |
| 584            | 4%                         | _       | _               | _                | _       |
| 730            | 5%                         | —       | _               | -                | _       |
| 1095           | 7,5%                       | _       | _               | _                | _       |
| 1460           | 10%                        | —       | _               | _                | _       |
| 1825           | 12,5%                      | 0,001   | _               | _                | _       |
| 2190           | 15%                        | 0,1699  | _               | _                | _       |
| 2552           | 17,5%                      | 3,08    | 0,0006          | -                | —       |
| 2919           | 20%                        | 17,05   | 0,035           | _                | _       |
| 3284           | 22,5%                      | 43,92   | 0,54            | _                | _       |
| 3649           | 25%                        | 71,04   | 3,45            | _                | _       |
| 4014           | 27,5%                      | 88,04   | 12,39           | 0,0002           | _       |
| 4379           | 30%                        | 95,86   | 28,92           | 0,0039           | _       |
| 4744           | 32,5%                      | 98,72   | 49,60           | 0,042            | _       |
| 5109           | 35%                        | 99,63   | 68,86           | 0,26             | _       |
| 5474           | 37,5%                      | 99,90   | 82,82           | 1,04             | _       |
| 5839           | 40%                        | 99,97   | 91,44           | 3,15             | _       |
| 6204           | 42,5%                      | 99,993  | 96,07           | 7,63             | _       |
| 6569           | 45%                        | 99,998  | 98,28           | 15,12            | _       |
| 6934           | 47,5%                      | 99,999  | 99,28           | 25,63            | _       |
| 7298           | 50%                        | 100     | 99,71           | 38,20            | _       |
| 7663           | 52,5%                      | 100     | 99,89           | 51,46            | _       |
| 8028           | 55%                        | 100     | 99,95           | 63,86            | _       |
| 8393           | 57,5%                      | 100     | 99,98           | 74,40            | 0,0001  |
| 8758           | 60%                        | 100     | 99,994          | 82.61            | 0.0003  |
| 9123           | 62,5%                      | 100     | 99,997          | 88,67            | 0,0012  |
| 9488           | 65%                        | 100     | 99,999          | 92.86            | 0.0058  |
| 9853           | 67.5%                      | 100     | 99,999          | 95,64            | 0,0182  |
| 10218          | 70%                        | 100     | 100             | 97,38            | 0,0468  |
| 10583          | 72,5%                      | 100     | 100             | 98,48            | 0,1163  |
| 10948          | 75%                        | 100     | 100             | 99,12            | 0,2648  |
| 11313          | 77,5%                      | 100     | 100             | 99,50            | 0,5348  |
| 11678          | 80%                        | 100     | 100             | 99,72            | 1,0     |
| 12043          | 82,5%                      | 100     | 100             | 99,85            | 1,75    |
| 12407          | 85%                        | 100     | 100             | 99,92            | 2,90    |
| 12772          | 87,5%                      | 100     | 100             | 99,95            | 4,57    |
| 13137          | 90%                        | 100     | 100             | 99,97            | 6,89    |
| 13502          | 92,5%                      | 100     | 100             | 99,98            | 9,89    |
| 13867          | 95%                        | 100     | 100             | 99,992           | 13,60   |
| 14232          | 97,5%                      | 100     | 100             | 99,996           | 18,05   |
| 14597          | 100%                       | 100     | 100             | 99,997           | 23,16   |

| Продолжительность пери | иодов процессов | зарождения и ра | азвития трещин |
|------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
|------------------------|-----------------|-----------------|----------------|

| Период процесса зарождения и развития трещин | Процент повторов циклограммы 6-8-5-7-6 с нарушением ВХР от общего числа |               |                |               |
|--|---|---------------|----------------|---------------|
|  | Серия 1   | Серия 2       | Серия 3        | Серия 4       |
| Инкубационный период                         | до 3 %  | до 4 %        | до 7,5 %       | до 15 %       |
| Период роста                                 | 3 % - 12,5 %  | 4 % - 17,5%   | 7,5 % - 27,5 % | 15 % - 57,5 % |
| Период вероятностного<br>образования         | 12,5 % - 50 %   | 17,5 % - 70 % | более 27,5 %   | более 57,5 %  |
| Период детерминированного развития           | более 50 %  | более 70 %    | _              | _             |

5.2.4 Зависимость вероятности образования граничной трещины от процента повторов циклограммы 6-8-5-7-6 с нарушением ВХР от общего числа повторов цепочки для четырех серий расчетов представлена на рисунке 10.



Процент повторов циклограммы 6-8-5-7-6 с нарушением ВХР от общего числа повторов, %

- Серия 1 (КО более 0,5 мг/кг)
- Серия 2 (КО 0,3875 мг/кг)
- Серия 3 (КО 0,275 мг/кг)
- Серия 4 (КО 0,1625 мг/кг)



5.2.5 Анализ результатов (рисунок 5.3, таблица 5.4), полученных для четырех серий расчетов с нарушением ВХР показал, что образование граничной трещины с вероятностью равной 1, достигается при следующих значениях процента повторов циклограммы с нарушением ВХР от общего числа повторов:

- для первой серии расчетов – более 47,5 %;

- для второй серии расчетов – более 67,5 %.

Для третьей и четвертой серии расчетов вероятность образования граничной трещины равной 1 не достигается, для четвертой серии расчетов вероятность образования граничной трещины не превышает 23,16 %.

#### 6 Заключение

6.1 Проведен анализ вероятности образования граничных трещин (п. 4.8.1) в перемычке коллектора первого контура парогенератора блока 4 Калининской АЭС и блоков 3, 4 Ростовской АЭС с точки зрения их зарождения и последующего роста в предположении, что после изготовления дефекты в коллекторах отсутствуют.

6.2 Анализ опыта эксплуатации показал, что основным механизмом повреждения коллекторов является ЗДКР при наличии примесей меди в воде второго контура [7]. При отсутствии меди ЗДКР не наблюдается [7].

6.3 Учитывая, что при разработке проекта блока 4 Калининской АЭС блоков и 3, 4 Ростовской АЭС были реализованы меры по исключению медьсодержащих сплавов из второго контура, влияние меди в данном расчете не учитывалось. Расчет был проведен с использованием программы ПРОГНОЗ, разработанной в соответствии с утвержденной методикой РД ЭО 0330-1 [3].

6.4 Расчет вероятностей повреждаемости для групп ячеек показал, что при соблюдении проектных требований к ВХР (п. 3.4.1) суммарная повреждаемость на окончательный момент времени 40 лет даже для наиболее напряженных групп ячеек не достигает значения равного 1, поэтому на момент эксплуатации 40 лет трещины не образуются. Оценка среднегодовой вероятности образования течи Ду≥100 для восьми коллекторов блока не превысит значения 10<sup>-7</sup>. Результаты представлены в подразделе 5.1.

6.5 Проведен расчет условных вероятностей возникновения трещин при нарушениях ВХР (таблица 5.3) для качественного анализа влияния нарушения ВХР. Результаты показали (таблицы 5.4, 5.5 и рисунок 10), что при нарушениях ВХР в 10 % режимов эксплуатации с пуском и остановом РУ не происходит возникновения трещин даже при 10-кратном нарушении ВХР по кислороду. Статистических анализ базы данных по ВХР, имеющейся в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» показал, что такие нарушения норм ВХР I и II контура отсутствуют.

1 Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97 НП-001-097 (ПНАЭГ-01-011-97), Москва, 1997

2 Отчет о верификации программного комплекса ПРОГНОЗ для ПЭВМ по расчету вероятности повреждаемости перемычек коллектора парогенератора РУ ВВЭР-1000, 2010

3 Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР, и ЗГП на стадии эксплуатации, РДЭО 0330-01. Концерн «РОСЭНЕРГОАТОМ», Москва, 2004

4 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86, Москва, Энергоатомиздат, 1989

5 Программный комплекс для ПЭВМ. Программный комплекс для решения термомеханических задач методом конечных элементов, ANSYS, ANSYS Mechanical; v.7.1, CADFEM GMBH, 2003

6 Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва, Наука, 1969

7 А.Г. Казанцев, А.С. Зубченко, С.А. Харченко, О.Ю. Петрова. Влияние шлама CuO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на коррозионное растрескивание стали 10ГН2МФА в высокотемпературной воде. Сборник трудов конференций «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 8 международный семинар по горизонтальным парогенераторам, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, 19-21 мая 2010