

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ГЦТ АЭС С ВВЭР С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ

Аванов А.В. (НИУ «МЭИ», Москва, Россия; АО «ЗиО-Подольск», Подольск, Россия), Воробьев Ю.Б. (НИУ «МЭИ», Москва, Россия; НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия), Никитченко И.А. (НИУ «МЭИ», Москва, Россия, АО «ЗиО-Подольск», Подольск, Россия)

Введение

Главный циркуляционный трубопровод (ГЦТ) является важным для безопасности элементом АЭС с реактором ВВЭР. От его прочности при воздействии различных нагрузок зависит безопасность эксплуатации АЭС. В настоящее время для расчетов на прочность оборудования атомной энергетики широко используются расчетные коды типа ANSYS Mechanical [1] и Логос Прочность, реализующие метод конечных элементов. Для анализа напряженного состояния ГЦТ с помощью представленных ранее программ необходимо точно определить влияние механических характеристик металла трубопровода на статическую прочность трубопровода в режиме гидроиспытания и на его сейсмическую прочность при заданном спектре ускорений.

Во всех расчетных программах используются различные эмпирические модели и методы, что приводит к погрешностям расчетов. Кроме того, используемые в расчетных моделях данные также могут быть неточны по следующим причинам:

- ошибки измерения, вызванные срабатыванием различных систем;
- технологические допуски изготовления оборудования;
- изменение характеристик оборудования в течении эксплуатации.

Данные неточности рассматриваются как неопределенности используемых параметров. Особенно широко это используется в теплогидравлических кодах [2, 3, 4, 5].

Основными исходными данными для проведения расчетов на прочность являются:

- геометрические характеристики конструкции.
- механические характеристики материала: предел текучести, предел прочности, относительное сужение, коэффициент термического расширения, модуль Юнга, коэффициент Пуассона.
- приложенные нагрузки: давление гидроиспытаний, сейсмические спектры отклика.

1. Учет неопределенностей в расчетах на прочность главного циркуляционного трубопровода

Существуют разные методы анализа неопределенности (АН) согласно [2]. В данном случае использовался метод аналогичный методу, используемому в [3], основанный на формуле Вилкса, для нахождения границ толерантного интервала результирующих параметров. Эта формула имеет вид:

$$1 - \frac{\alpha^N}{100} - N\left(1 - \frac{\alpha^N}{100}\right) \frac{\alpha^{N-1}}{100} \geq \frac{\beta}{100},$$

где α – вероятность, определяющая толерантный интервал, в котором будут лежать полученные данные; $1 - \beta$ – вероятность ошибки в полученной оценке толерантного интервала. Таким образом, для получения 95% толерантного интервала для результирующей величины, например максимальных напряжений, с 95% уверенностью необходимо провести 93 расчета. В текущих расчетах генерировалось 100 вариантов, чтобы с запасом учесть возможные нестабильности расчетов.

В данной работе рассматривается ГЦТ АЭС с ВВЭР-100/В 320. ГЦТ состоит из трех участков: одного прямого, подающего теплоноситель от ГЦНА к реактору, и двух

участков, содержащих гиб под 90°: от реактора к горячему коллектору ПГ, и от холодного коллектора ПГ к ГЦНА. Опор ГЦТ не имеет. Схема расположения оборудования и трассировки ГЦТ циркуляционной петли с КД РУ АЭС с ВВЭР-1000 представлена на рис. 1.

Генерация вариантов в рамках АН проводилась методом Монте-Карло с использованием программы в среде Mathcad [6]. Вероятностное распределение для рассматриваемых параметров полагалось нормальное, так как оно наиболее часто встречается на практике в технических системах. Кроме того, суть метода не меняется и не зависит от вида распределения. Пределы текучести, прочности, а также относительное сужение были увеличены, в соответствии с данными статьи [7], так как в нормативной документации приведены гарантированные характеристики, а в реальности они выше. При расчете использовался материал ГЦТ ВВЭР-1000, сталь 15Х2НМФА. Материал трубопровода не отличается от основного материала реактора, поэтому применение статьи [7] допустимо. Границы интервалов изменения свойств приведены в табл. 1.

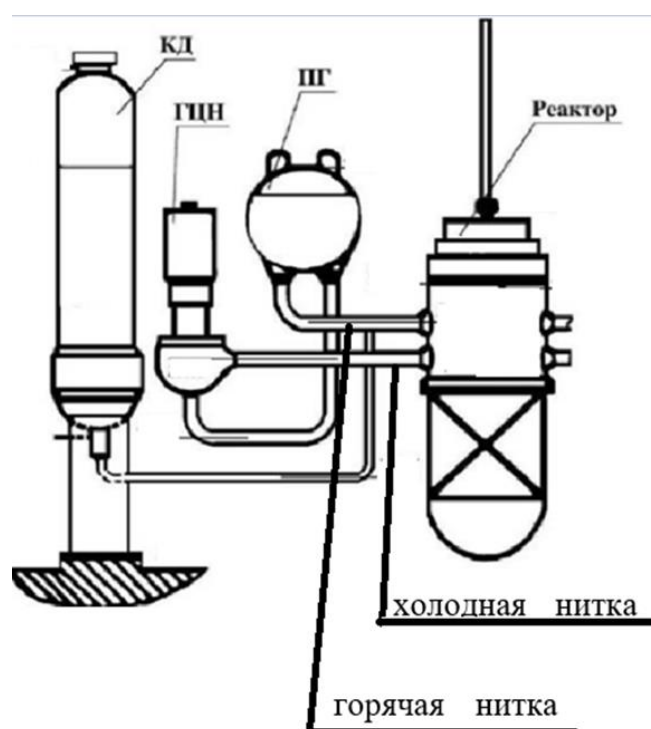


Рис. 1. Схема расположения оборудования и трассировка ГЦТ

Таблица 1

№ свойства	Свойство	Номинальное значение	Нижняя граница % от столбца 2/ значение	Верхняя граница % от столбца 2/ значение	Среднее значение
1	Предел текучести, МПа	490	0,9/441	1,4/686	563,5
2	Предел прочности, МПа	610	0,9/549	1,4/854	701,5
3	Относительное сужение, %	55	0,9/50	1,3/72	61
4	Модуль упругости, ГПа	205	0,9/184,5	1,1/225,5	205
5	Коэффициент Пуассона	0,3	0,95/0,285	1,05/0,315	0,3
6	Температура ГИ, С	50	0,95/47,5	1,05/52,5	50
7	Коэфф термин расшир, 1/С	1.2E-5	0,9/1,08E-5	1,1/1,32E-5	1.2E-5
8	Давление гидроиспытания, МПа	24,525	0,95/23,299	1,05/25,751	23,299

Температуру гидроиспытаний принимали по [7], сейсмическую нагрузку задавали в виде спектр-отклика по [8]. Для расчета использовали линейно-спектральный метод с учетом ускорения нулевого периода (ZPA), в соответствии с [8]. В работе использовали программный пакет ANSYS Mechanical [1].

Для анализа выбирали участок ГЦТ с максимальными напряжениями в зонегиба в режиме гидроиспытаний согласно номинальным значениям параметров таблицы 2. В данной таблице представлены результаты расчетов для указанных участков ГЦТ при одинаковых входных данных.

Таблица 2

Участок ГЦТ	Максимальные напряжения, МПа
Холодный коллектор ПГ – ГЦН	272,25
Горячий коллектор ПГ – реактор	295,34
ГЦН – реактор	164,28

Перед проведением расчетов важно правильно построить конечно-элементную модель и провести исследование сеточной сходимости. Для создания сетки использовался Hex Dominated Method. Метод строит тетраэдрическую сетку на основе поверхностного разбиения и разбиения ребер. Данный метод позволяет наиболее быстро и легко разбить геометрическую модель со сложной геометрией, но требователен к качеству построения CAD-модели. Также необходимо учитывать, что уменьшение размера элемента сетки приводит к экспоненциальному росту количества элементов и используемой памяти, а также времени расчета. Таким образом, рано или поздно происходит достижение границы аппаратных ресурсов и увеличение времени расчета. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Размер типичного элемента, мм	Кол-во элементарных объемов	Максимальные напряжения Мпа, $\sigma_{\text{макс}}$	Время, затраченное на расчет	Используемая память компьютера
15	1908645	228,34	21 мин 16 с	14,277
30	849679	295,34	8 мин 23 с	6,1133
50	367175	296,91	3 мин 47 с	2,918
70	252579	298,23	2 мин 52 с	2,2715
90	213910	299,93	2 мин 33 с	2,0576
100	204062	297,51	2 мин 39 с	2,043

Из таблицы 3 видно, определенная стабилизация результатов расчетов по отношению к показателю максимальных напряжений $\sigma_{\text{макс}}$ наступает для элементов размера 30–70 мм. Дальнейшее увеличение размера элемента до 100 мм приводит к существенному снижению точности расчета. Таким образом, консервативно был выбран размер элемента сетки 30 мм. При этом при увеличении размера элемента происходит сначала рост величины максимальных напряжений, а потом их падение.

На рисунке 2 приведена расчетная модель для определения напряжений от действия давления гидроиспытания, при этом красным цветом выделены области приложения нагрузок, а желтым – области приложения закреплений. Условия симметрии моделировались граничными условиями. Закрепление моделировалось командой Remote displacement, позволяющая запретить перемещения в определенных направлениях, но при этом оставить возможность деформирования для модели. Моделировался коллектор парогенератора и сегмент корпуса реактора вместе с патрубком для повышения консервативности расчета. Сначала выполнялся референтный расчет, на основе данных приведенных в литературе [7], результаты показаны на рис. 3, 4 и в табл. 3. Затем проводился АН.



Рис. 2. Расчетная модель

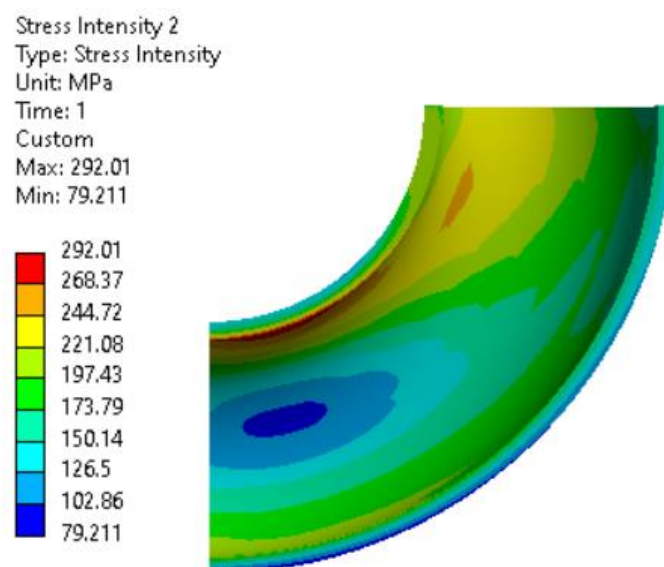


Рис. 3. Напряженное состояние при гидроиспытании, МПа

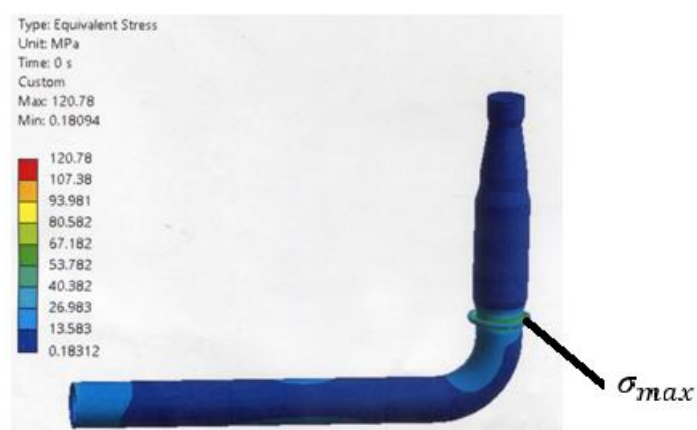


Рис. 4. Напряженное состояние при сейсмической нагрузке, МПа

В рамках АН производили расчет напряженно-деформированного состояния от действия давления гидроиспытания для каждого из 100 вариантов. На рисунке 3 приведено напряженное состояниегиба ГЦТ в режиме гидроиспытаний. Далее для референтного варианта были получены формы колебаний ГЦТ с присоединенным горячим коллектором, соответствующие собственным частотам: 16.9, 18.0, 26.8, 31.2, 58.7, 76.5 Гц. На рисунке 4 приведено напряженное состояние от сейсмических нагрузок для референтного варианта. Цвета в соответствии со шкалой показывают распределение напряжений. Основное влияние сейсмическая нагрузка оказывает на зону закрепления коллектора парогенератора.

Для анализа результатов АН полезно использовать гистограммы распределений по рассчитанным параметрам, так как они позволяют качественно оценить вероятностные характеристики полученных выборок. Некоторые характерные типы распределения величин, полученных в рамках АН, приведены на рис. 5, 6. Анализ гистограмм позволил заключить, что ряд величин имеют распределение, схожее с нормальным.

В таблице 4 приводятся средние значения результатов, среднееквадратичное отклонение (СКО) и коэффициент вариативности, полученные в рамках АН.

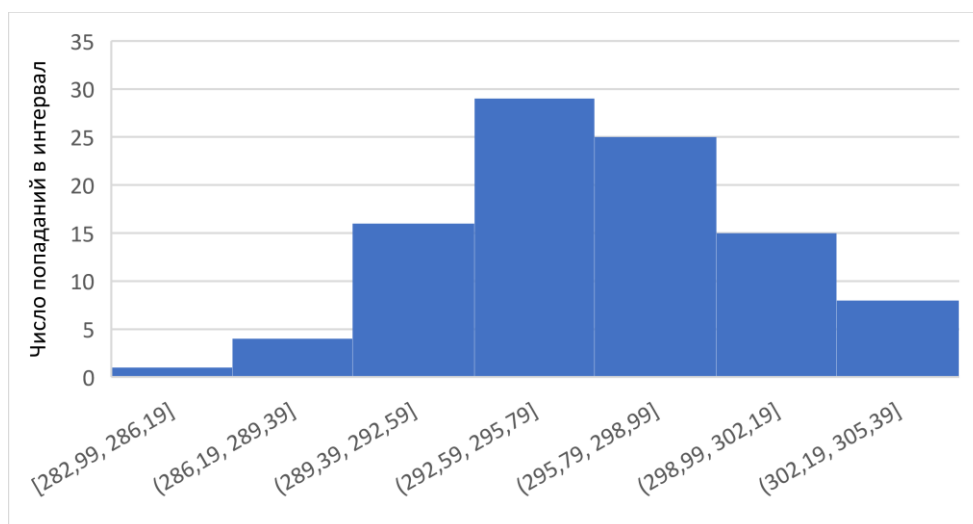


Рис. 5. Гистограмма распределения максимальных напряжений

Параметр	Среднее значение по АН	Референтное значение	Наибольший вариант	Наименьший вариант	Макс, относ, отклонение АН от рефер, %	СКО	Коэф, вариативности, %
Максим, напряжения, МПа, $\sigma_{\text{макс}}$	295,97	294,12	304,92	282,99	3,9	4,132	1,40
Сред, напряжения, МПа, $\sigma_{\text{ср}}$	173,00	174,18	178,38	165,25	5,4	2,434	1,41
Максимальная деформация, мм, $\epsilon_{\text{макс}}$	3,671	3,751	3,937	3,4244	9,5	0,101	2,75
Средняя деформация, мм, $\epsilon_{\text{ср}}$	2,209	2,189	2,366	2,057	7,4	0,0612	2,76
1 собственная частота, Гц	16,8	16,5	17,2	16,3	3,7	0,174	1,03
2 собственная частота, Гц	17,9	17,8	18,3	17,3	2,7	0,187	1,04
3 собственная частота, Гц	26,7	26,3	27,4	26,0	3,9	0,285	1,06
4 собственная частота, Гц	31,0	30,8	31,7	30,1	2,9	0,329	1,06
5 собственная частота, Гц	58,4	58,0	59,8	56,7	3,1	0,625	1,07
6 собственная частота, Гц	76,1	74,9	78,0	73,8	3,9	0,811	1,06
Деформ, максим, мм, $\epsilon_{\text{макссейсм}}$	3,339	3,318	3,641	3,146	8,9	0,0781	2,33
Деформ, средняя, мм, $\epsilon_{\text{срсейсм}}$	3,222	3,188	3,526	3,046	9,6	0,0865	2,67
Эквивал, напряжения по Мизесу макс,, МПа, $\sigma_{\text{макс,эк}}$	120,78	122,16	124,02	119,15	2,5	0,771	0,63
Эквивал, напряжения средние, МПа, $\sigma_{\text{ср,эк}}$	41,62	41,74	42,55	41,08	1,9	0,271	0,65

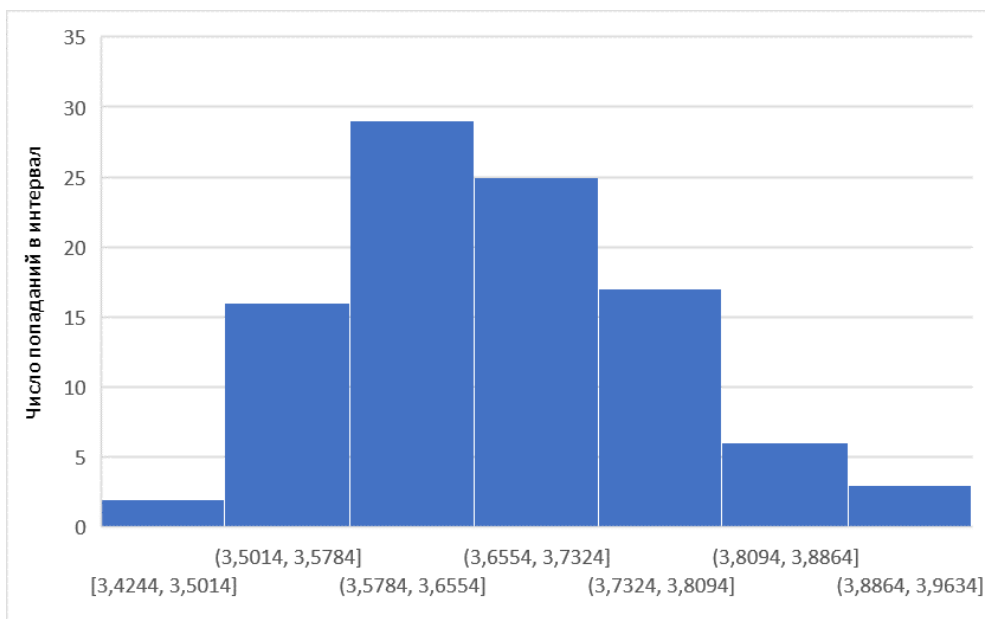


Рис. 6. Гистограмма распределения максимальных деформаций

Таблица 4

Из анализа данных таблицы 4 можно заключить следующее. Средние значения по толерантному интервалу для ряда параметров: $\sigma_{\text{макс}}$, $\epsilon_{\text{ср}}$ и величин собственных частот колебания ГЦТ превышают референтные (стандартные) данные. В тоже время для ряда средних по расчетному домену характеристик, например: $\sigma_{\text{ср}}$, $\sigma_{\text{ср.эк.}}$, $\epsilon_{\text{ср}}$, средние значения и референтные лежат достаточно близко. Также видно, что для ряда величин полученные границы толерантных интервалов, например, $\epsilon_{\text{макс}}$, $\epsilon_{\text{срсейсм}}$, существенно отличаются от референтных. По полученным в АН относительным максимальным отклонениям от референтных значений можно выделить как наиболее существенные: $\epsilon_{\text{макс}}$, $\epsilon_{\text{ср}}$, $\epsilon_{\text{макссейсм}}$ и $\epsilon_{\text{срсейсм}}$.

Необходимо также отметить, что 1-я собственная частота лежит в диапазоне от 16,3 до 17,2 Гц, а собственная частота вращений вала ГЦН равна 16,6 Гц согласно [9]. Таким образом, при определенной комбинации варьируемых параметров возникают условия для резонанса колебания потока теплоносителя и ГЦН, что может привести к увеличению амплитуды напряжений и снижению прочности оборудования.

Таким образом анализ результирующих данных позволяет заключить следующее:

1. Распределение исследуемых параметров близко к нормальному.
2. Параметры, характеризующие деформацию металла ГЦТ под воздействием статических и сейсмических нагрузок, ($\epsilon_{\text{макс}}$, $\epsilon_{\text{ср}}$, $\epsilon_{\text{макссейсм}}$, $\epsilon_{\text{срсейсм}}$) обладают наибольшей вариативностью в рамках АН.
3. Помимо параметров с высокой вариативностью присутствуют также исследуемые величины, максимальные значения которых имеют отклонения от их референтных значений величин до 10% в рамках АН.
4. Обнаружены условия для возникновения резонанса частот потока теплоносителя и вала ГЦН.

2. Анализ чувствительности

После проведения АН выполнялся анализ чувствительности (АЧ). Вычислялись три коэффициента корреляции:

- 1) Пирсона – показывает линейную взаимосвязь
- 2) Кендалла – показывает нелинейную зависимость и более эффективен при малых выборках, выбросах в данных

3) Спирмена – показывает нелинейную зависимость

Данные корреляционные коэффициенты по-разному оценивают статистическую взаимосвязь между величинами, и поэтому интересно провести их сравнение. Пример распределения коэффициентов корреляции (1–3) по параметрам неопределенности для максимальной деформации при нагружении давлением гидроиспытания приведен на рис. 7. Номера исследуемых величин на рис. 7 совпадают с нумерацией параметров в табл. 1.

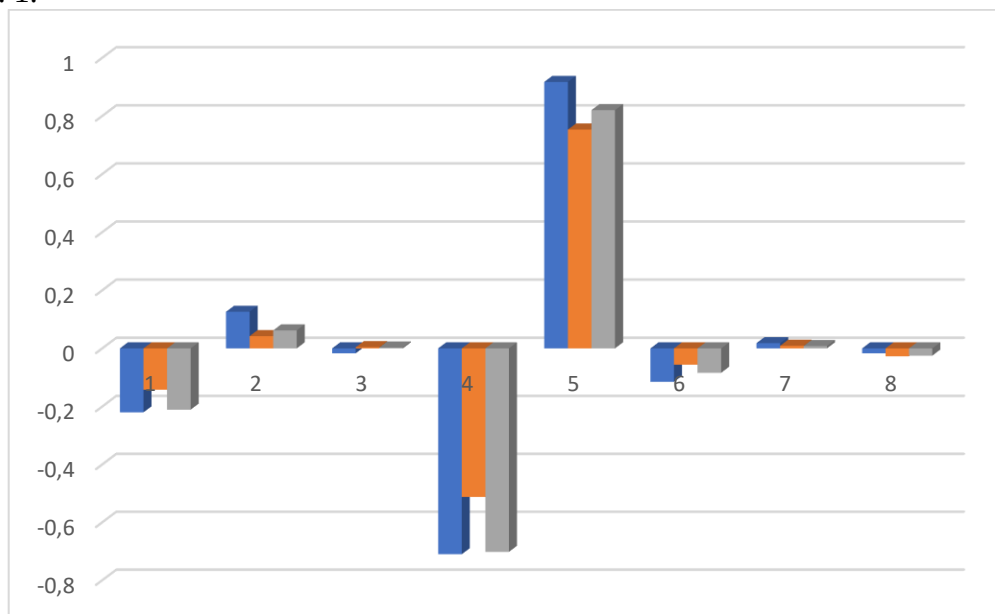


Рис. 7. Корреляционные коэффициенты Пирсона (синий), Спирмена (оранжевый) и Кендалла (серый) для параметров таблицы 1 относительно максимальной деформации при сейсмическом нагружении

Видно, что наибольшее влияние достигается от модуля Юнга (№ 4 на графике). Также существенное воздействие оказывает коэффициент Пуассона (№ 5 на графике). Получено, что значения коэффициентов корреляции Пирсона и Кендалла близки друг другу для большинства параметров, в то время как коэффициент Спирмена обладает тенденцией к занижению. В результате было выявлено, что на величину максимальных деформаций при сейсмических нагрузках наиболее сильно влияют: коэффициент Пуассона и модуль Юнга.

Заключение

В работе были применены методы АН и АЧ к расчетам напряженно-деформированного состояния с использованием конечно-элементного расчетного кода ANSYS Mechanical ГЦТ реактора типа ВВЭР-1000. В исследовании выделены параметры, чья неопределенность может оказать влияние на результаты, определены их характеристики. В расчетах рассмотрен наихудший сценарий сочетания нагрузки от гидроиспытаний и сейсмических колебаний. Было показано, что границы полученного 95% толерантного интервала значительно отличаются по ряду параметров от расчетов на основе стандартных значений параметров, что говорит о необходимости учета неопределенности исходных параметров. АЧ, в свою очередь, позволил выделить параметры, неточность информации по которым оказывает наибольшее влияние на ширину толерантного интервала и их уточнение позволит его сузить.

Характер распределения величин, полученных в рамках АН, и их значимая разница по сравнению с референтными данными показывают, что необходимо учитывать результаты АН в расчете прочности ГЦТ реактора при обосновании безопасности АЭС.

Рассмотренный подход актуален для расчетов на циклическую прочность ГЦТ

для режимов нарушения нормальной эксплуатации и аварийных режимов работы АЭС. Рассмотренный метод АН может использоваться в рамках анализа тяжелых аварий на АЭС при моделировании разрушения ГЦТ АЭС с ВВЭР-1000.

Список литературы

1. *Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф.* ANSYS для инженеров, М.: Машиностроение-1, 2004.
2. Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций. РБ-166-20, Москва, 2020.
3. *Воробьев Ю.Б., Кузнецов В.Д., Мансури М.* Оценка влияния неопределенных факторов при анализе аварийных процессов на АЭС с ВВЭР, Теплоэнергетика № 9, 2006 г.
4. *Мансури М.* Анализ неопределенностей параметров при моделировании динамических процессов в контурах АЭС с ВВЭР: дис. к.т.н., – М.: 2005.
5. *Воробьев Ю.Б., Кузнецов В.Д.* Использование современных интегральных кодов для управления безопасностью АЭС// Вестник МЭИ. – 2001. №5. – С. 31–37.
6. Mathcad 15.0, РТС.
7. Хмельницкая АЭС, база данных по ЯППУ, 43–923.203.007.БД.02, ред. 1.
8. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86, – М.: Энергоатомиздат, Москва, 1989.
9. *Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М.* Системы диагностирования ВВЭР, 2010.