

Расчетный анализ напряженного состояния узла соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при сейсмическом воздействии

А. А. Ходаковский, А. Ю. Чирков, В. В. Харченко

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Приведены результаты расчета напряженного состояния узла соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 в области сварного шва № 111 при моделировании сейсмического нагружения, заданного с помощью спектров отклика вертикальных и горизонтальных колебаний. Расчет сейсмических напряжений выполнен на основе линейно-спектрального анализа с использованием пространственной конечноэлементной модели реакторной установки ВВЭР-1000/338.

Ключевые слова: парогенератор, коллектор, реакторная установка, сейсмические воздействия, спектр отклика, собственные частоты и формы, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

Введение. При эксплуатации парогенераторов (ПГ) на действующих АЭС обнаружены повреждения в узлах соединения “горячего” коллектора с патрубком в пределах расчетного срока службы. Ранее [1–3] представлены результаты уточненной расчетной оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) узла такого соединения с учетом пространственного распределения напряжений и реальных условий эксплуатации конструкции. В работе [4] приведены результаты расчетного анализа по определению глобального НДС реакторной установки (РУ) ВВЭР-1000 при моделировании сейсмических воздействий. Задача решалась в трехмерной постановке на основе уравнений линейно-упругой среды с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [5].

В настоящей работе представлены результаты уточненного расчета НДС в области сварного шва (СШ) № 111 при моделировании сейсмического нагружения, заданного в виде спектров отклика вертикальных и горизонтальных колебаний. Расчет сейсмических напряжений выполнен на основе линейно-спектрального анализа с использованием пространственной конечно-элементной модели РУ малой серии ВВЭР-1000/338. Для обоснования корректности расчетной модели и точности результатов расчетов использовали три варианта конечноэлементных сеток, последовательно сгущаемых в области галтельного перехода. В первом варианте расчета использовали три конечных элемента по толщине стенки патрубка, во втором – пять, в третьем – семь. Максимальная погрешность в определении расчетных эквивалентных напряжений для второго и третьего вариантов расчета не превышала 9%.

Особенности методики расчета. Реакторная установка ВВЭР-1000/338 представляет собой сложную пространственную конструкцию. При использовании аналитических методов расчетная модель значительно упрощается, что снижает степень достоверности получаемых результатов. В связи с этим

необходимо применять численные методы расчета, в частности МКЭ, а также современные программно-вычислительные комплексы, ориентированные на использование современной вычислительной техники.

В настоящее время расчет на сейсмические воздействия РУ ВВЭР проводят в основном с использованием оболочечно-стержневой модели, так как конструкция РУ достаточно сложная и ее приходится существенно упрощать [6]. В то же время с помощью этой модели нельзя описать НДС конструкции в полной мере. Например, ее применение не позволяет получить достоверную оценку НДС узла соединения “горячего” коллектора с патрубком ПГ в области СШ № 111 РУ ВВЭР-1000/338.

В настоящей работе задачу об определении НДС конструкции РУ ВВЭР-1000/338 при сейсмическом нагружении решали на основе уравнений линейно-упругой среды с использованием трехмерной дискретной модели МКЭ.

Насколько известно авторам, количество публикаций, посвященных расчетному анализу сейсмостойкости РУ ВВЭР с использованием глобальной пространственной модели МКЭ, весьма ограничено. Это объясняется трудностями практического характера, возникающими при численной реализации расчетных методов решения дискретных конечноэлементных задач большой размерности, и необходимым количеством расчетных мод свободных колебаний исследуемой конструкции. Перечисленные факторы определяют актуальность проведения расчетов конструкции РУ и ее элементов на сейсмические воздействия с использованием трехмерной модели МКЭ с целью получения уточненных результатов расчетной оценки НДС.

В настоящее время для решения задачи об определении НДС конструкции, находящейся под воздействием сейсмического нагружения, применяются следующие расчетные методы [7].

Метод статического анализа сейсмостойкости. Согласно статической теории сейсмостойкости инерционные нагрузки на конструкцию определяются наиболее просто при условии, что значения всех собственных частот выше частот возбуждения. В этом случае вынужденными колебаниями пренебрегают, и конструкция рассматривается как абсолютно твердое тело. Максимальная инерционная нагрузка задается в виде обобщенной силы, приложенной в центре тяжести конструкции, а определение отклика конструкции сводится к решению задачи статики.

Метод динамического анализа сейсмостойкости. Метод динамического анализа конструкции основывается на пошаговом интегрировании дифференциальных уравнений движения, описывающих поведение системы при сейсмическом возбуждении. Отклик системы вычисляется через достаточно малые интервалы времени, в начале и в конце каждого из которых устанавливаются условия динамического равновесия. При динамическом анализе в качестве исходной сейсмологической информации используются записи сейсмических движений грунта. Методом динамического анализа могут рассчитываться как линейные, так и нелинейные системы.

Линейно-спектральный метод расчета на сейсмостойкость. В настоящее время для расчета конструкций на сейсмостойкость, в том числе сооружений и оборудования АЭС, наиболее широко применяется линейно-спектральная теория сейсмостойкости. При линейно-спектральном методе расчета

используется исходное сейсмическое воздействие, заданное в виде спектров отклика, чаще всего спектров ускорений. Спектр отклика представляет собой зависимость спектральной величины от частоты колебаний. При определении сейсмических нагрузок в расчетах учитывают ограниченное количество низших собственных форм колебаний конструкции, собственная частота которых не превышает наибольшую частоту с заданными спектрами отклика.

В данной работе для расчета реакторной установки ВВЭР-1000/338 на сейсмические воздействия в трехмерной постановке применяли линейно-спектральный метод. Заметим, что с помощью этого метода рассчитывают перемещения и напряжения. Базируется он на результатах решения обобщенной спектральной задачи о нахождении собственных частот и форм свободных колебаний дискретной модели РУ. Линейно-спектральный метод рассматривается как альтернатива динамическому анализу и применяется он для определения реакции системы при нагрузках, зависящих от времени (например, землетрясение).

Кроме того, линейно-спектральный метод является, по-сути, квазистатическим, поскольку реальные действующие нагрузки, зависящие от динамических параметров системы, рассматриваются в расчетах как статические. Достоинством метода является то, что спектр отклика, используемый в расчете, может быть получен путем наложения спектров, соответствующих многим записям сейсмических колебаний грунта [7]. Его преимущество по сравнению с другими методами состоит в том, что в расчете учитывается только ограниченное количество низших собственных частот и форм колебаний конструкции. Это существенно сокращает вычислительные затраты и ресурсы требуемой памяти компьютера при проведении численных расчетов.

Поскольку линейно-спектральный метод расчета основан на разложении решения системы дифференциальных уравнений движения по собственным формам, необходимо предварительно выполнить модальный анализ. Под модальным анализом понимается обобщенная спектральная задача определения собственных частот и форм (мод) свободных колебаний конструкции.

Характерной особенностью спектральной задачи является то, что собственные формы определяются с точностью до постоянного множителя и, следовательно, их необходимо нормировать. При расчете конструкций АЭС на сейсмические воздействия линейно-спектральным методом масштабирование собственных форм проводится с помощью данных о спектрах отклика.

При решении задачи о напряженном состоянии РУ ВВЭР-1000/338 линейно-спектральным методом в качестве сейсмических воздействий принимали обобщенные спектры отклика вертикальных и горизонтальных колебаний (рис. 1) при сейсмичности площадки 6 бал и относительном коэффициенте демпфирования $K = 0,02$ [8].

Собственные моды расчетной модели РУ ВВЭР-1000/338 определяли в диапазоне частот 0...30 Гц. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что частоты и моды свободных колебаний РУ указанного выше частотного диапазона не оказывали существенного влияния на НДС конструкции, и, значит, ее состояние, соответствующее этим частотам, принимали как абсолютно жесткое.

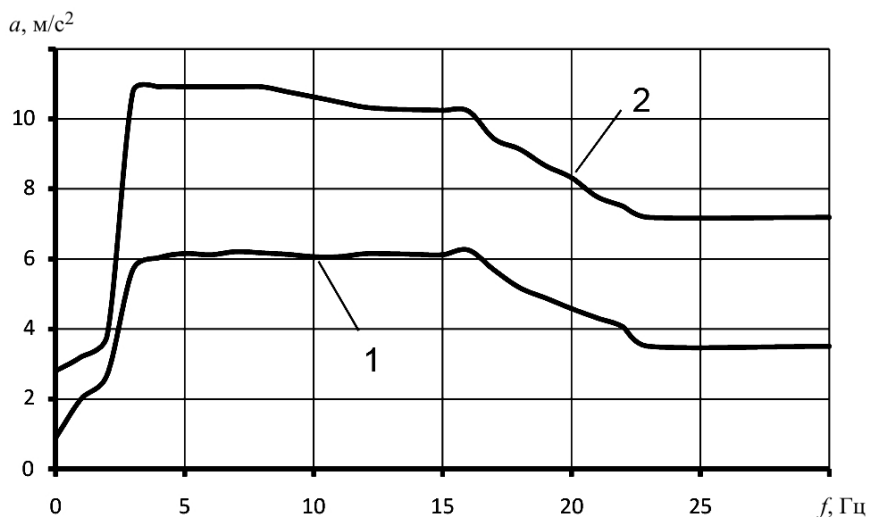


Рис. 1. Обобщенные спектры отклика при сейсмичности площадки 6 бал и относительном коэффициенте демпфирования $K = 0,02$: 1 – вертикальные возмущения; 2 – горизонтальные возмущения.

Для определения суммарной реакции расчетной модели на спектральное воздействие применяли SRSS метод, в котором результатом суммирования является квадратный корень из суммы квадратов, и CQC метод полной квадратной комбинации [6–8]. На практике SRSS метод используется чаще CQC метода, хотя при сравнении с методом динамического анализа последний позволяет получить более точные результаты расчета [6].

Расчетная модель реакторной установки ВВЭР-1000/338. На рис. 2 представлена расчетная модель РУ ВВЭР-1000/338.

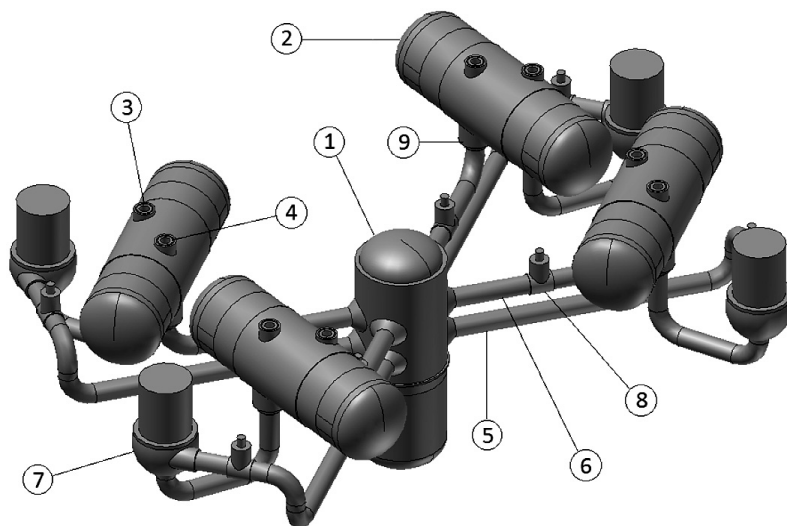


Рис. 2. Расчетная модель РУ ВВЭР-1000/338: 1 – корпус реактора (КР); 2 – ПГ; 3 – “холодный” коллектор ПГ; 4 – “горячий” коллектор ПГ; 5 – “холодная” нитка главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ); 6 – “горячая” нитка ГЦТ; 7 – главный циркуляционный насос (ГЦН); 8 – главная запорная задвижка (ГЗЗ); 9 – узел соединения с патрубком ПГ, включая СШ № 111.

Влиянием остального оборудования и трубопроводов первого контура РУ на оценку НДС в данной расчетной модели пренебрегали.

Массу реактора ВВЭР-1000/338 в заполненном состоянии принимали равной 700 т, массу ПГ в заполненном состоянии – 445 т, массу ГЦН – 140,8 т, массу ГЗЗ – 17 т, погонный вес ГЦТ – 21500 Н/м. Модуль Юнга составлял $2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,3.

При расчете РУ ВВЭР на сейсмостойкость моделировали стационарные опоры. В качестве основной опоры КР принимали опорный бургт, позволяющий исключить перемещение КР в горизонтальном и вертикальном направлении.

Вертикальные опоры, воспринимающие вес ПГ, представляют собой конструкцию с роликами, которые не препятствуют перемещению ПГ в продольном и поперечном направлении при температурном расширении ГЦТ.

Для ограничения смещений ПГ при динамическом нагружении применяются гидроамортизаторы. При расчете РУ на сейсмические воздействия последние моделировали в виде жестких опор, что ограничивало перемещения ПГ в горизонтальной плоскости.

Главный циркуляционный насос опирается на роликовые опоры, которые позволяют перемещаться конструкции при температурном расширении ГЦТ. При проведении расчета РУ на сейсмические воздействия моделировали кинематические условия, согласно которым ГЦН закрепляли от возможности перемещения в вертикальном и горизонтальном направлении [6].

На рис. 3 представлена дискретная модель РУ ВВЭР-1000/338, включающая 1355536 узлов конечноэлементной сетки. При проведении расчетов РУ на сейсмические воздействия использовали квадратичные конечные элементы в форме шестигранных призм [5].

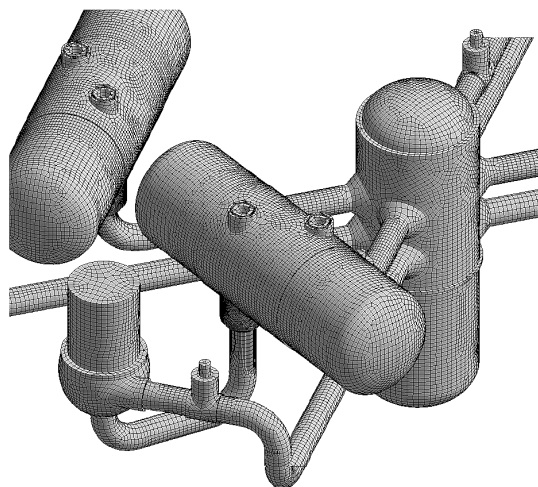


Рис. 3. Фрагмент конечноэлементной модели РУ ВВЭР-1000/338.

Анализ результатов расчета. На рис. 4 представлены результаты модального анализа РУ ВВЭР-1000/338 в заполненном состоянии. Собственные моды определяли в диапазоне частот 0...30 Гц. Для указанного частотного диапазона РУ имеет 40 форм свободных колебаний, причем минимальная и максимальная частоты составляют 10,26 и 28,62 Гц соответственно.

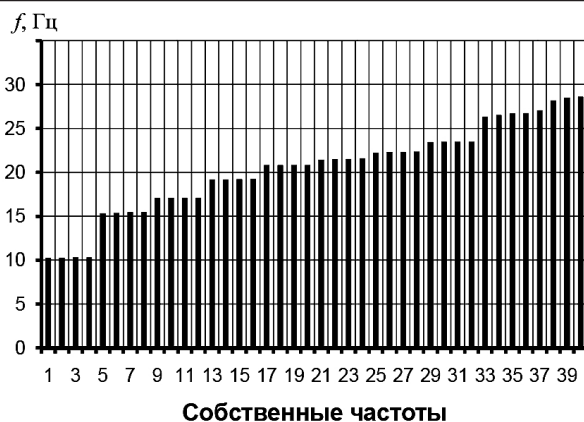


Рис. 4. Значения собственных частот РУ ВВЭР-1000/338.

На рис. 5 показаны схематизация и трехмерная модель фрагмента конструкции узла соединения горячего коллектора с патрубком ПГ, наиболее нагруженным элементом которого является утоненная часть патрубка, включая СШ № 111. Характерной особенностью конструкции узла соединения является наличие кармана – кольцевой зазор между коллектором и патрубком ПГ, заполненный при эксплуатации теплоносителем второго контура.

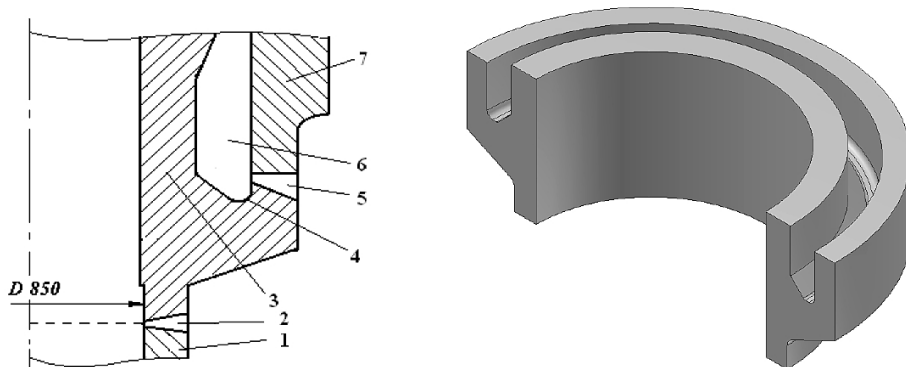


Рис. 5. Фрагмент конструкции узла соединения горячего коллектора с корпусом ПГ: 1 – ГЦТ; 2 – сварной шов; 3 – коллектор ПГ; 4 – галтель; 5 – СШ № 111; 6 – карман; 7 – патрубок ПГ.

На рис. 6–13 приведены расчетные распределения эквивалентных напряжений на внутренней поверхности патрубка вдоль окружной координаты и по толщине патрубка горячего коллектора на расстоянии 20 мм от дна кармана. Графики распределений по толщине соответствуют окружной координате, при которой достигаются максимальные напряжения на внутренней поверхности патрубка. Результаты расчета приведены для заполненного состояния РУ при вертикальных и горизонтальных возмущениях.

Задачу решали при трех вариантах конечноэлементных сеток, последовательно сгущаемых в области галтельного перехода. В первом варианте расчета использовали три элемента по толщине стенки патрубка, во втором – пять элементов, в третьем – семь.

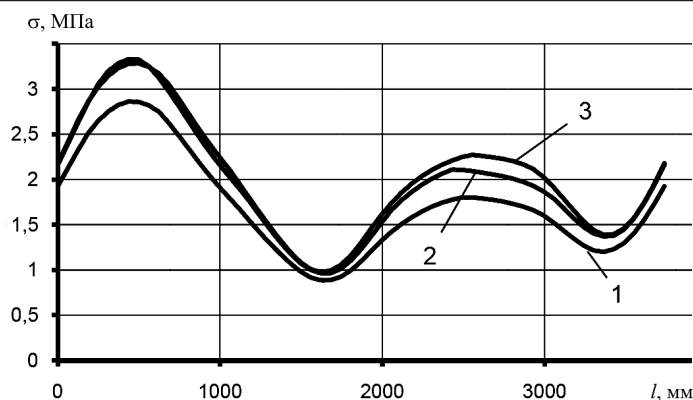


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений по окружности стенки горячего коллектора в зоне СШ № 111 при вертикальных возмущениях. (Здесь и на рис. 7–9: 1 – три элемента по толщине стенки патрубка; 2 – пять элементов; 3 – семь элементов.)

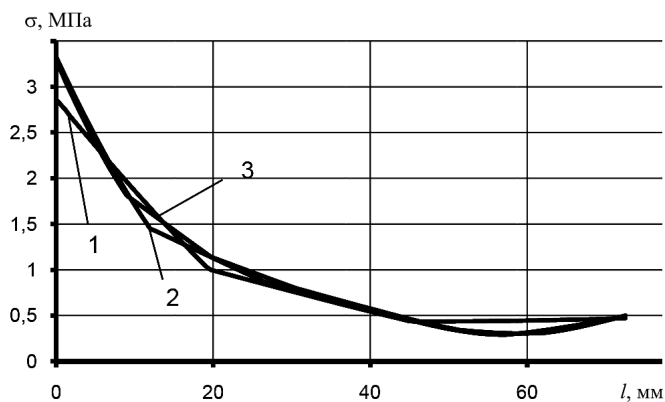


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений по толщине стенки горячего коллектора в зоне СШ № 111 при вертикальных возмущениях.

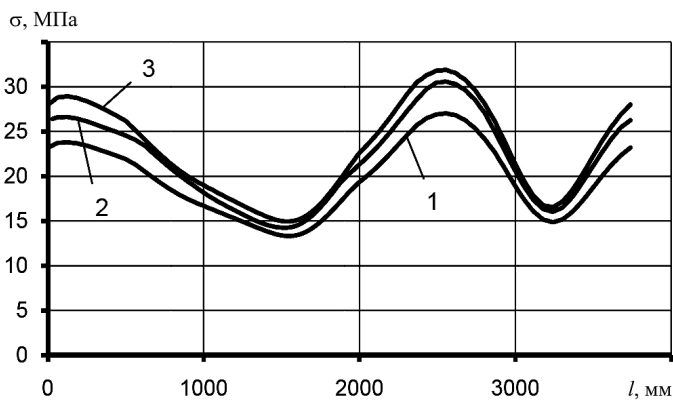


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений по окружности стенки горячего коллектора в зоне СШ № 111 при горизонтальных возмущениях.

На рис. 6–9 показаны распределения эквивалентных напряжений в зоне СШ № 111. Максимальная погрешность в определении расчетных эквивалентных напряжений при втором и третьем вариантах расчета не превышает 9%.

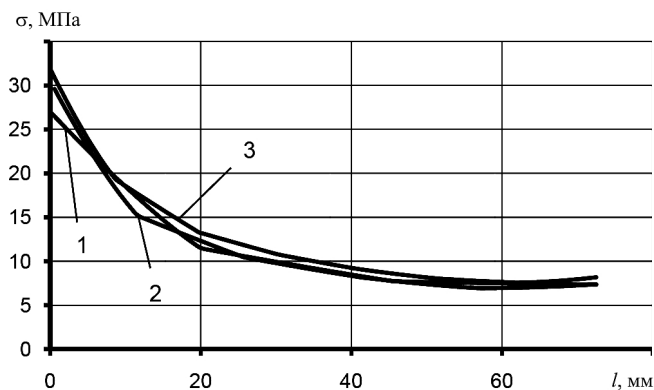


Рис. 9. Распределение эквивалентных напряжений по толщине стенки горячего коллектора в зоне СШ № 111 при горизонтальных возмущениях.

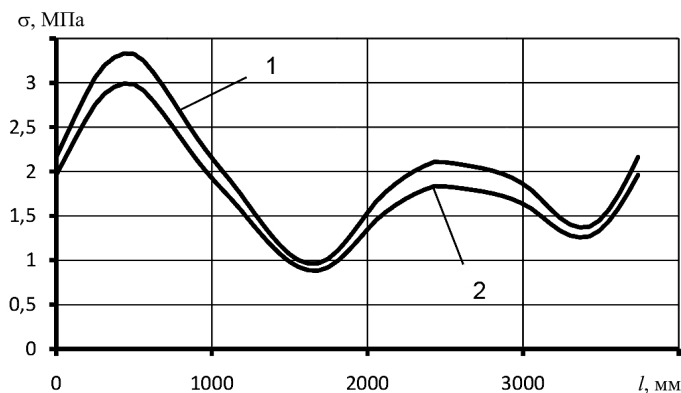


Рис. 10. Распределение эквивалентных напряжений по окружности стенки горячего коллектора в зоне СШ № 111 при вертикальных возмущениях. (Здесь и на рис. 11–13: 1 – SRSS метод; 2 – CQC метод.

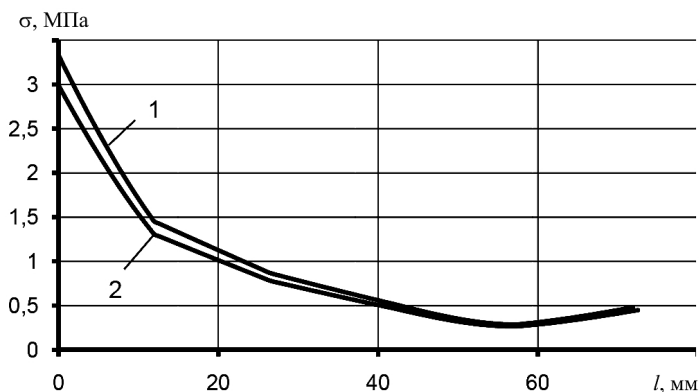


Рис. 11. Распределение эквивалентных напряжений по толщине стенки горячего коллектора в зоне СШ № 111 при вертикальных возмущениях.

На рис. 10–13 представлены распределения эквивалентных напряжений, полученные с использованием SRSS и CQC методов применительно к расчетной модели, включающей пять элементов по толщине патрубка. Видно, что расчетные напряжения, определенные по SRSS методу, имеют более высокий

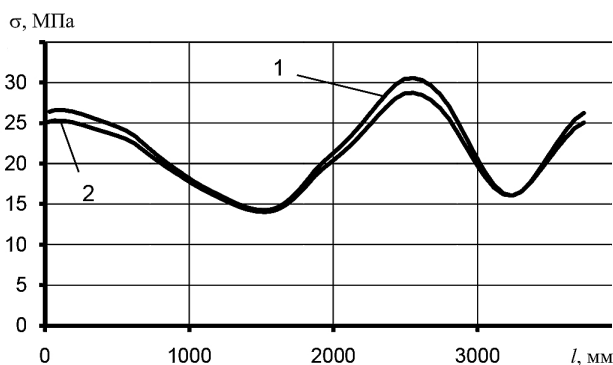


Рис. 12. Распределение эквивалентных напряжений по окружности стенки горячего коллектора в зоне СШ № 111 при горизонтальных возмущениях.

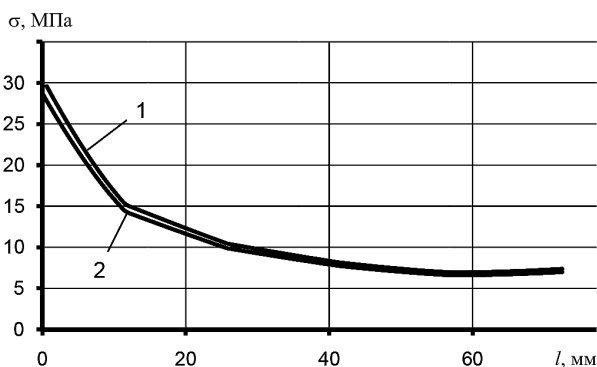


Рис. 13. Распределение эквивалентных напряжений по толщине стенки горячего коллектора в зоне СШ № 111 при горизонтальных возмущениях.

уровень по сравнению с СQC методом. Кроме того, максимальные расчетные напряжения отмечаются на внутренней поверхности патрубка. Максимальные напряжения при вертикальных колебаниях, полученные по SRSS и СQC методами соответственно составляют 3,33 и 2,99 МПа, при горизонтальных: 28,71 и 29,6 МПа.

Заключение. Разработанная расчетная модель и результаты трехмерного конечноэлементного анализа позволили оценить напряженное состояние основных элементов РУ ВВЭР-1000/338, находящихся под воздействием сейсмических нагрузок.

Расчет сейсмических напряжений в элементах РУ ВВЭР-1000 проведен при относительном коэффициенте демпфирования $K = 0,02$ и сейсмичности площадки 6 бал. Для вычисления суммарной реакции расчетной модели РУ на сейсмические воздействия использовали метод корня квадратного из суммы квадратов и метод полной квадратной комбинации.

Согласно результатам расчетов максимальные эквивалентные напряжения действуют на внутренней поверхности патрубка ПГ на расстоянии 20 мм от дна кармана, причем их уровень существенно зависит от направления сейсмического возбуждения и метода суммирования мод. На основании полученных результатов расчета максимальные расчетные напряжения достигаются при горизонтальном возбуждении и не превышают 30 МПа.

Резюме

Наведено результати розрахунку напруженого стану вузла з'єднання “горячого” колектора з патрубком парогенератора ПГВ-1000 в області зварного шва № 111 при моделюванні сейсмічного навантаження, що задане за допомогою спектрів відклику вертикальних і горизонтальних коливань. Розрахунок сейсмічних напружень виконано на основі лінійно-спектрального аналізу з використанням просторової скінченноелементної моделі реакторної установки ВВЕР-1000/338.

1. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Оценка термодинамического нагружения в узле приварки “горячего” колектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 // Пробл. прочности. – 2002. – № 1. – С. 146 – 148.
2. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния узла соединения “горячего” колектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС // Там же. – 2003. – № 5. – С. 142 – 153.
3. Харченко В. В., Степанов Г. В., Кравченко В. И. и др. Перераспределение напряжений в узле соединения колектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при его нагружении после термообработки // Там же. – 2009. – № 3. – С. 25 – 31.
4. Ходаковский А. А., Чирков А. Ю., Харченко В. В. Расчетная оценка напряженного состояния узла соединения колектора с патрубком парогенератора при сейсмическом воздействии // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2010. – № 33. – С. 222 – 231.
5. Zienkiewicz O. C. and Taylor R. L. The Finite Element Method. – Vol. 1–3. – Butterworth-Heinemann: Oxford; Auckland; Boston; Johannesburg; Melbourne; New Delhi, 2000. – 1482 p.
6. Шарый Н. В., Семишкин В. П., Пиминов В. А., Драгунов Ю. Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. – М.: ИздАТ, 2004. – 496 с.
7. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. – СПб.: Наука, 1998. – 255 с.
8. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомнадзор, 1989. – 525 с.

Поступила 22. 02. 2012