

Влияние компоновки реакторов ВВЭР “малой” и “большой” серий атомных электростанций на напряженно-деформированное состояние узла приварки коллектора к патрубку парогенератора

**Г. В. Степанов^а, В. В. Харченко^а, А. И. Бабуцкий^а, С. В. Кобельский^а,
И. В. Орыняк^а, С. В. Романов^б, Н. Б. Трунов^в, В. В. Денисов^в, В. А.
Пиминов^в**

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

^б Ассоциация “Надежность машин и сооружений”, Киев, Украина

^в ОКБ “Гидропресс”, Подольск, Россия

Приведены уточненные результаты оценки напряженно-деформированного состояния узла приварки “горячего” коллектора к корпусу парогенератора реакторов ВВЭР-1000 “малой” и “большой” серий с использованием трехмерных моделей. Показано, что компоновка парогенераторов в реакторах оказывает влияние на максимальные напряжения в области сварного шва.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, узел приварки, коллектор, парогенератор.

Введение. Традиционно напряженно-деформированное состояние (НДС) узла приварки рассчитывали исходя из учета давления в первом и втором контурах парогенератора (ПГ) как доминирующего фактора нагружения. При этом использовались упрощенные осесимметричные расчетные схемы. Результаты расчетов показали, что ПГ может безопасно эксплуатироваться в пределах расчетного срока в 30 лет.

Однако в связи с обнаружением трещин в узле приварки “горячего” коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 на ряде АЭС с реакторами ВВЭР-1000 “малой” серии при эксплуатации в пределах расчетного срока службы [1, 2] возникла необходимость выполнения уточненных расчетов НДС. Из детального анализа конструкции ПГ следует, что сопряжение патрубка меньшего диаметра с корпусом существенно большего диаметра выполнено со значительным эксцентриситетом их осей. Поэтому расчеты НДС с использованием осесимметричных моделей узла не обеспечивают необходимой точности результатов. Кроме того, анализ процесса разогрева конструкции и вызванного им термического расширения элементов ПГ при гидроиспытаниях (ГИ), нормальных условиях эксплуатации (НУЭ), испытаниях главного циркуляционного насоса (ГЦН) выявил дополнительный фактор нагружения узла приварки – изгибающий момент в плоскостигиба горячей ветви главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ), возникающий вследствие некомпенсированного термического расширения элементов конструкции. Уточненные расчеты НДС этого узла с использованием трехмерных расчетных моделей, учитывающих изгибающий момент, подтвердили существенное влияние этих факторов на его максимальную напряженность [2].

© Г. В. СТЕПАНОВ, В. В. ХАРЧЕНКО, А. И. БАБУЦКИЙ, С. В. КОБЕЛЬСКИЙ, И. В. ОРЫНЯК,
С. В. РОМАНОВ, Н. Б. ТРУНОВ, В. В. ДЕНИСОВ, В. А. ПИМИНОВ, 2007

В настоящее время данные о наличии повреждений в реакторах “большой” серии отсутствуют, в связи с чем возникает вопрос о причинах различия в долговечности узлов приварки в реакторах малой и большой серий. В данной работе рассматривается влияние компоновки реакторов на уровень максимальных напряжений в области сварного шва.

Особенности компоновки реакторов малой и большой серий. Анализ конструкции узла приварки, идентичного для реакторов обеих серий, выполнен ранее [2]. Поэтому будут рассмотрены только различия в их компоновке. Общий вид одной из четырех горячих ветвей первого контура реакторов малой и большой серий, включающий парогенератор, горячую ветвь ГЦТ и корпус реактора (КР), представлен на рис. 1. Холодная ветвь ГЦТ с ГЦН является более протяженной и имеет сложную конфигурацию (на рисунках не показана).

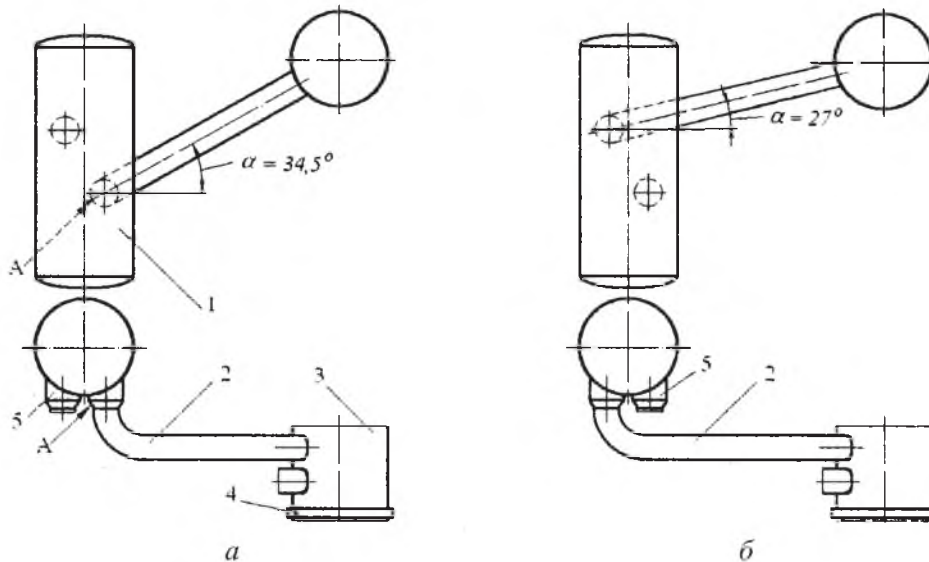


Рис. 1. Схемы подсоединения горячей ветви ГЦТ к парогенератору для ВВЭР малой (а) и большой (б) серий (вид сверху и сбоку): 1 – ПГ; 2 – горячая ветвь ГЦТ; 3 – КР; 4 – опорный бурт; 5 – патрубок холодной ветви ГЦТ; А – места разрушения.

Принципиальное различие в компоновке ПГ реакторов малой и большой серий заключается в том, что в первом случае горячая ветвь ГЦТ подсоединяется к ближайшему (по отношению к КР) коллектору ПГ (рис. 1,а), а в реакторах большой серии при незначительном изменении угла между осью ПГ и осью горячей ветви ГЦТ последняя подсоединяется к коллектору ПГ, расположенному с противоположной стороны относительно оси парогенератора (рис. 1,б). Далее будет показано, что такое различие в компоновке оказывает влияние на перераспределение напряжений в узле приварки, вызванное действием изгибающего момента, на их максимальную величину и местоположение.

Термосиловое нагружение узла приварки. Конструкция ПГ предусматривает максимальную компенсацию перемещения элементов ПГ в горизонтальной плоскости вследствие термического расширения при разогреве реак-

тора [2]. Однако анализ показал, что в узле приварки горячего коллектора к патрубку ПГ возникает изгибающий момент, действующий в плоскостигиба горячей ветви ГЦТ. Таким образом, данный фактор нагружения следует определять и учитывать в расчетах НДС.

Для уточненной оценки изгибающего момента в узле приварки вследствие некомпенсированного расширения ГЦТ и КР было выполнено численное моделирование поведения первого контура реакторов малой и большой серий, включая все его элементы (КР, горячую и холодную ветви ГЦТ, ГЦН, корпус ПГ с патрубками и коллекторами, опоры), с учетом нагружения давлением и повышения температуры. Для этого использовали специализированную программу для расчетов трубопроводов сложной пространственной конфигурации, основанную на методе начальных параметров. Подробное описание и методика расчетов с помощью этой программы, а также условия, по которым определяются начальные параметры, приведены в [3]. При моделировании учитывали пространственную геометрию петли первого контура реактора соответствующей серии, свойства материалов составляющих элементов, а также действующие нагрузки (давление, вес, изменение температуры от исходной до рабочей ΔT) и условия крепления элементов петли (в расчетах ограничивали перемещения таких элементов конструкции, как КР, ГЦТ, ГЦН в вертикальном направлении). Результаты расчетов изгибающего момента (табл. 1) были использованы при расчете НДС узла приварки.

Т а б л и ц а 1

Исходные данные и результаты расчетов изгибающего момента в узле приварки

Режим нагружения	Давление P_1/P_2 , МПа	Температура, °С		Изгибающий момент M , МН·м	
		горячая ветвь ГЦТ	холодная ветвь ГЦТ	малая серия	большая серия
НУЭ	16/6	300	260	2,279	2,035
ГИ на прочность	25/11	110	110	1,082	0,935
ГИ на плотность	18/8	110	110	0,977	0,845
Испытания ГЦН	16/6	90	90	0,827	0,835

Примечание: P_1 – давление теплоносителя в первом контуре; P_2 – давление теплоносителя во втором контуре.

Результаты расчетов НДС узла приварки. Расчеты НДС основываются на положениях линейной теории упругости и теории малых упруго-пластических деформаций для трехмерных изотропных и кусочно-неоднородных тел. Решение формулируемых этими теориями краевых задач осуществлялось с помощью смешанной вариационной схемы метода конечных элементов [4, 5], реализованной в программе SPACe для трехмерного анализа [6].

Геометрическую модель ПГ выбирали с учетом всех силовых воздействий на узел приварки. Принимали, что нагрузки от веса внутреннего оборудования ПГ незначительны, и ими можно пренебречь. Расчеты выполняли

для геометрической модели ПГ с одним “горячим” коллектором и для модели ПГ с горячим и холодным коллекторами.

Расчет с использованием модели с двумя коллекторами был выполнен для оценки взаимного влияния узлов приварки горячего и холодного коллекторов при действии давления в коллекторах и корпусе ПГ. Как показали расчеты, такое влияние практически отсутствует, различие в напряжениях не превышает 2%. Поэтому основная часть расчетов была выполнена для модели с одним горячим коллектором, сечение которого плоскостью xOz показано на рис. 2.

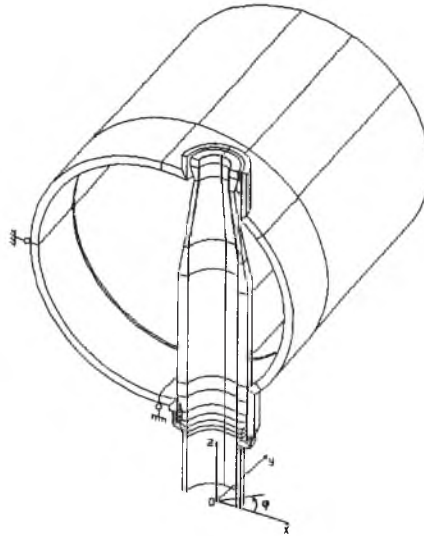


Рис. 2. Расчетная модель парогенератора.

Внешние воздействия на узел приварки моделировали изгибающим моментом, приложенным к нижнему торцу коллектора, с учетом различия в его ориентации для реакторов малой и большой серий. Давление теплоносителя в коллекторе и корпусе ПГ принимали в соответствии с режимами испытаний и эксплуатации.

НДС узла приварки определяли для режима НУЭ, режимов ГИ на прочность и плотность, а также испытаний ГЦН (табл. 1).

Расчеты выполняли в линейной постановке, т.е. определяли условно упругие перемещения, деформации и напряжения, а НДС в соответствующих точках получали суммированием напряжений, вызванных отдельными нагрузками. Основные результаты расчетов представлены на рис. 3–5.

Согласно этим результатам максимальные напряжения в области “кармана” – кольцевой полости между коллектором и патрубком [2], локализованы несколько ниже линии сопряжения галтели с внутренней цилиндрической поверхностью патрубка ПГ (приблизительно 15 мм от дна кармана), что практически соответствует месту выявленного разрушения – рис. 2. Изгибающий момент, действующий со стороны ГЦТ и вызванный некомпенсированным термическим расширением ГЦТ и КР, оказывает существенное влияние на НДС узла приварки, повышая уровень максимальных растяги-

вающих напряжений на поверхности кармана в области галтельного перехода в реакторах малой серии. В реакторах большой серии изгибающий момент со стороны ГЦТ вызывает более низкие растягивающие напряжения.

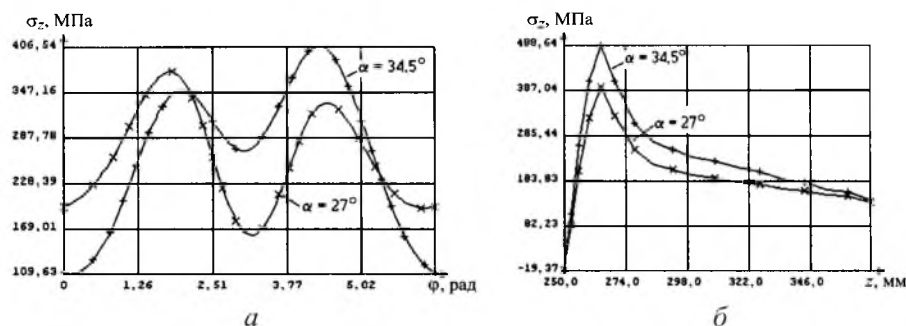


Рис. 3. Распределение напряжений σ_z на стенке кармана со стороны патрубка ПГ по его окружности на высоте 20 мм от дна кармана – *a* и вдоль образующей кармана при $\varphi = 4,3$ рад – *б*, вызванное совместным действием теплоносителя и изгибающего момента при ГИ ($p_1/p_2 = 25/11$ МПа): малая серия $M = 1,082$ МН·м; большая серия $M = 0,935$ МН·м.

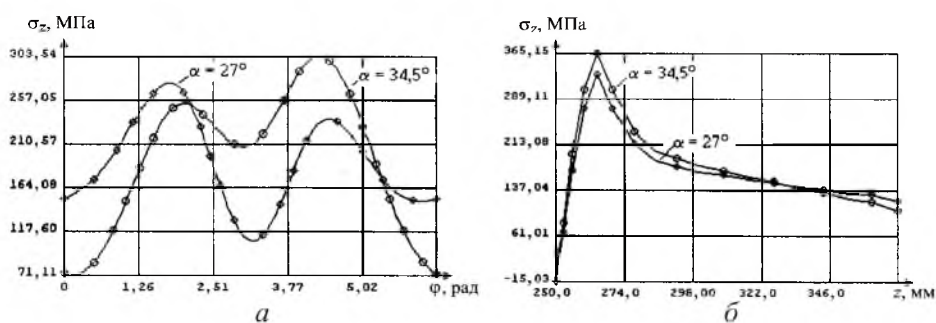


Рис. 4. Распределение напряжений σ_z на стенке кармана со стороны патрубка ПГ по его окружности на высоте 20 мм от дна кармана – *a* и вдоль образующей кармана при $\varphi = 4,3$ рад (малая серия) и $\varphi = 1,8$ рад (большая серия) – *б*, вызванное совместным действием теплоносителя и изгибающего момента при ГИ ($p_1/p_2 = 18/8$ МПа): малая серия $M = 0,977$ МН·м; большая серия $M = 0,845$ МН·м.

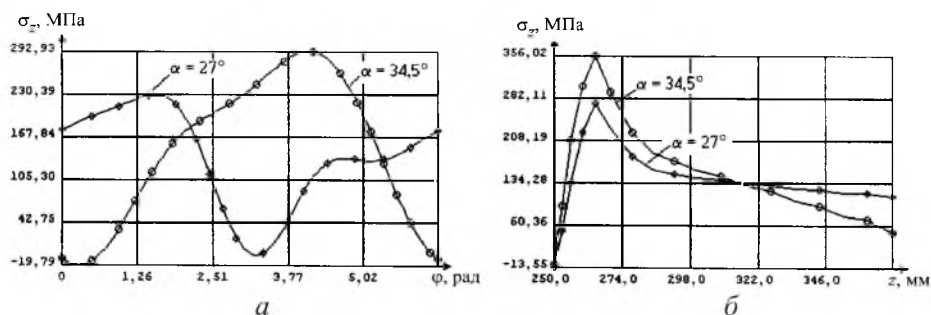


Рис. 5. Распределение напряжений σ_z на стенке кармана со стороны патрубка ПГ по его окружности на высоте 20 мм от дна кармана – *a* и вдоль образующей кармана при $\varphi = 4,1$ рад (малая серия) и $\varphi = 1,6$ рад (большая серия) – *б*, вызванное совместным действием теплоносителя и изгибающего момента при ГИ ($p_1/p_2 = 16/6$ МПа): малая серия $M = 2,279$ МН·м; большая серия $M = 2,035$ МН·м.

Влияние изгибающего момента на НДС узла приварки для реакторов малой и большой серий вызвано различием в их компоновке. В реакторах большой серии изгибающий момент не повышает уровня максимальных растягивающих напряжений, так что максимальная напряженность узла приварки определяется практически давлением теплоносителя в первом и втором контурах. При нормальных условиях эксплуатации максимальные напряжения не превышают предела текучести материала. При ГИ на прочность и плотность максимальные условно-упругие напряжения выше предела текучести, однако они ниже, чем в реакторах малой серии.

В табл. 2 представлены значения максимальных осевых (σ_z), главных (σ_1) и приведенных упругих напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$) [7] в области галтельного перехода в кармане узла приварки, возникающих в результате совместного действия давления и изгибающего момента, для реакторов малой и большой серий.

Т а б л и ц а 2

Максимальные напряжения в кармане (зона галтельного перехода) узла приварки

Режим нагружения	Максимальные напряжения, МПа		
	σ_z	σ_1	$\sigma_1 - \sigma_3$
НУЭ	356	382	356
	272	293	275
ГИ на прочность	489	522	490
	447	476	448
ГИ на плотность	365	390	366
	328	349	329
Испытания ГЦН	276	295	277
	242	258	243

Примечание: Значение над чертой соответствует реакторам малой серии, под чертой – реакторам большой серии.

Как показали расчеты, дополнительные напряжения в узле приварки, вызванные термическим расширением пучка теплообменных трубок, расширением коллекторов и искривлением их осей при запрессовке теплообменных трубок, являются незначительными (менее одного процента от величины изгибающего момента со стороны ГЦТ) и могут не учитываться в расчетах НДС.

Закключение. С использованием современных методов трехмерного численного моделирования сложных пространственных конструкций установлено, что влияние изгибающего момента, вызванного некомпенсированным расширением ГЦТ, на НДС и уровень максимальных напряжений в узле приварки для реакторов малой и большой серий зависит от их компоновки, что определяет различный уровень максимальных напряжений. Конструктивное исполнение узла приварки реакторов большой серии обеспечивает их повышенную долговечность.

Резюме

Наведено уточнені результати оцінки напружено-деформованого стану вузла приварки “гарячого” колектора до корпусу парогенератора реакторів ВВЕР-1000 “малої” і “великої” серій з використанням тривимірних моделей. Показано, що компоновка реакторів впливає на максимальні напруження в області зварного шва.

1. *Зубченко А. С., Разыграев Н. П., Харина И. Л. и др.* Результаты исследований характера эксплуатационных повреждений металла в зонах сварных узлов коллекторов с патрубками Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000: Тр. VII Междунар. конф. “Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”. – СПб., 2002.
2. *Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др.* Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС // Пробл. прочности. – 2003. – № 5. – С. 142 – 153.
3. *Орыняк И. В., Тороп В. М., Ромащенко В. А., Жураховский В. Н.* Расчет пространственного разветвленного трубопровода в программном комплексе оценки прочности оборудования АЭС // Там же. – 1998. – № 2. – С. 87 – 100.
4. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
5. *Сахаров А. С., Альтенбах И.* Метод конечных элементов в механике твердых тел. – Киев: Вища шк., 1982. – 478 с.
6. *Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)” // Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1. 017.0084261-02. – 2002.*
7. *ПНАЭ Г-7-002-86.* Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

Поступила 14. 06. 2006