

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.3

Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС

Г. В. Степанов^а, В. В. Харченко^а, А. И. Бабуцкий^а, С. В. Романов^б,
П. П. Ворошко^а, В. И. Кравченко^а, С. В. Кобельский^а, С. А. Радченко^а,
Н. А. Феофентов^в, И. В. Кравченко^в

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

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

^в ОП “Южно-Украинская АЭС”, Южно-Украинск, Украина

Приведены методика и основные результаты уточненной оценки напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора реактора ВВЭР-1000 АЭС при более полном учете реальных условий нагружения при эксплуатации. При расчетах учитывались напряжения, вызванные некомпенсированным термическим расширением элементов энергетической установки. Согласно результатам расчетов методом конечных элементов с использованием трехмерной модели уровень локальных напряжений в области узла превышает предел текучести металла. Расчетные напряжения на внешней поверхности патрубка удовлетворительно согласуются с результатами натурной тензометрии.

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

Введение. На стадии проектирования прочностные расчеты узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенераторов ПГВ-1000 блоков АЭС с реактором ВВЭР-1000 на статическую и циклическую прочность, на сопротивление хрупкому разрушению и другие выполняются в соответствии с нормами [1]. Результаты расчетов свидетельствуют о возможности безопасной эксплуатации парогенераторов (ПГ) в течение 30 лет. После обнаружения первых случаев повреждения данного узла при длительности эксплуатации гораздо ниже указанного срока проведены повторные расчеты в соответствии с нормами [1] и дополнительные исследования, в том числе материаловедческие [2]. Однако причины возникновения повреждений остались невыясненными.

При эксплуатации ПГ на разных АЭС обнаружено, что все повреждения (трещины) локализованы практически в одном и том же месте на узлах сварного соединения, изготовленных по различным технологиям (симметричная и несимметричная разделка кромок соединения, использование авто-

© Г. В. СТЕПАНОВ, В. В. ХАРЧЕНКО, А. И. БАБУЦКИЙ, С. В. РОМАНОВ, П. П. ВОРОШКО, В. И. КРАВЧЕНКО, С. В. КОБЕЛЬСКИЙ, С. А. РАДЧЕНКО, Н. А. ФЕОФЕНТОВ, И. В. КРАВЧЕНКО, 2003

матической и ручной сварки, предварительно наплавленные кромки и без наплавки). Следовательно, можно сделать вывод, что существует общая причина разрушений, а в расчетах не полностью учитываются особенности нагружения и деформирования (повреждения) материала в области узла сварного соединения.

В связи с обнаружением трещин в данных узлах ПГ при их эксплуатации в пределах расчетного срока службы были выполнены уточненная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) узла и расчет ресурса его работы с более полным учетом реальных условий эксплуатации. Основные результаты первой части исследований представлены ниже.

Конструкция и режимы нагружения узла сварного соединения.

Общий вид одной из “горячих” ветвей первого контура атомной энергетической установки с реактором ВВЭР-1000, включающей ПГ, часть главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) и корпус реактора (КР), приведен на рис. 1. Длина горизонтального участка “горячей” ветви трубопровода составляет 10 м, вертикального (с учетом гйба) – 1,5 м, расстояние от оси трубопровода на выходе из КР до его опорного бурта – 3 м. Угол между продольной осью ПГ и осью горизонтального участка трубопровода равен примерно 56° .

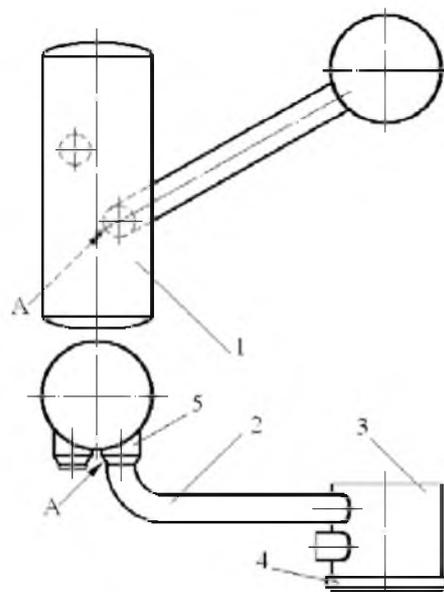


Рис. 1. Схема “горячей” ветви первого контура реакторной установки (вид сверху и сбоку): 1 – ПГ; 2 – ГЦТ; 3 – КР, 4 – опорный бурт КР, 5 – патрубок ПГ. (Здесь и на рис. 2: А – место инициирования разрушения.)

“Холодная” ветвь трубопровода (на рис. 1 не показана) включает “холодную” часть ГЦТ и главный циркуляционный насос (ГЦН), более протяженная и имеет сложную конфигурацию.

На рис. 2 показана конструкция узла сварного соединения, наиболее нагруженным несущим элементом которого является утоненная часть патрубка ПГ, включая, собственно, сварной шов. Эта часть патрубка воспринимает нагрузки, действующие на ПГ со стороны ГЦТ, вес присоединенных

к коллектору конструктивных элементов и теплоносителя, а также нагрузки, вызванные давлением в первом и втором контурах ПГ. Узел сварного соединения (патрубок ПГ и коллектор) изготовлен из стали 10ГН2МФА.

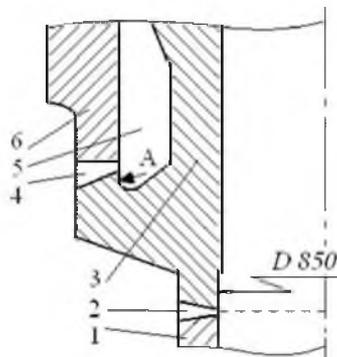


Рис. 2. Фрагмент узла сварного соединения: 1 – ГЦТ; 2, 4 – сварной шов; 3 – коллектор ПГ; 5 – “карман”; 6 – патрубок ПГ.

Характерная особенность конструкции узла – наличие так называемого “кармана” (кольцевой зазор между коллектором и патрубком ПГ, заполненный теплоносителем второго контура). В процессе эксплуатации ПГ в “кармане” накапливаются продукты коррозии с увеличенной концентрацией коррозионно-активных элементов, в частности меди. Для их выведения несколько раз в сутки выполняется продувка полости “кармана” водой из второго контура. В результате периодической продувки водой, температура которой ниже температуры теплоносителя в первом контуре и, следовательно, ниже температуры стенки коллектора, возникает режим термоциклирования на поверхности “кармана”. Влияние последнего на НДС было проанализировано в [3].

В проведенных ранее оценках принимали, что НДС рассматриваемого узла в основном определяется нагружением ПГ давлением теплоносителя в первом и втором контурах. Нагружение происходит как при гидроиспытаниях (ГИ), так и при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ).

При ГИ трубопроводы первого и второго контура и корпус ПГ нагружаются давлением выше эксплуатационного. В случае ГИ на плотность давления теплоносителя поднимают одновременно в первом контуре до $p_1 = 18$ МПа, во втором – до $p_2 = 8$ МПа, а на прочность – до $p_1 = 25$ МПа и $p_2 = 11$ МПа. После проведения ГИ давление в первом и втором контурах снижают практически до нуля.

В случае выхода энергетической установки на нормальные условия эксплуатации давление теплоносителя в первом и втором контурах одновременно поднимают до уровня $p_1 = 16$ МПа и $p_2 = 6$ МПа и поддерживают в течение всего времени эксплуатации вплоть до плановой (внеплановой) остановки. При выходе из режима эксплуатации (на стадии расхолаживания и снижения давления перед полной остановкой) проводится испытание ГЦН, в этом случае давление теплоносителя в первом и втором контурах одновременно поднимают до $p_1 = 16$ МПа и $p_2 = 6$ МПа, после чего снижают до минимума.

Необходимость, цели и регламент проведения перечисленных испытаний определены соответствующей технической документацией, и в данной работе не анализируются.

На рис. 3 показан характер изменения давления и температуры в “горячей” ветви первого контура теплоносителя энергетической установки при ГИ и выходе на режим НУЭ. На схеме представлен вариант ГИ на плотность, включающий однократный подъем и снижение давления. При реальной эксплуатации атомных энергетических установок с реактором ВВЭР-1000 гидроиспытания могут состоять из нескольких подъемов и снижений давления, практикуется также последовательное их проведение на прочность и плотность.

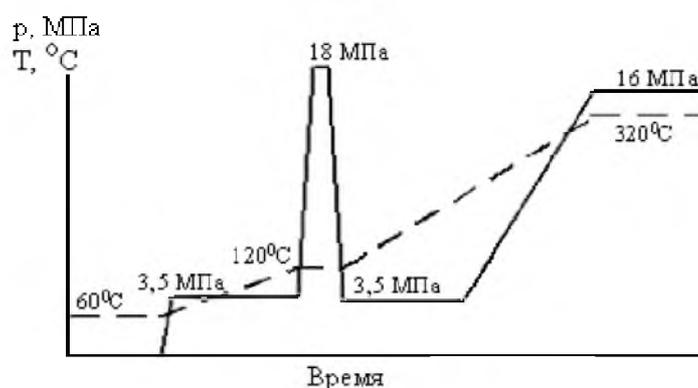


Рис. 3. Схема изменения давления и температуры в “горячей” ветви контура теплоносителя реактора при ГИ и выходе на режим НУЭ.

Выше указывалось, что традиционно НДС данного узла рассчитывают, принимая давление в первом и втором контурах ПГ в качестве доминирующего фактора нагружения. Однако детальный анализ поведения рассматриваемой конструкции при разогреве и расхолаживании показал наличие дополнительного существенного фактора нагружения узла, связанного с термическим расширением ее элементов.

Термосиловое нагружение узла сварного соединения. Конструкция и компоновка основного оборудования и трубопроводов энергетической установки с реактором ВВЭР-1000 выполнены таким образом, чтобы максимально компенсировать перемещения ее элементов вследствие термического расширения. Так, ПГ установлен на катковых опорах и может перемещаться в горизонтальной плоскости под действием усилий, вызванных термическим расширением (сужением) корпуса реактора и удлинением (укорочением) горизонтальных участков ГЦТ при разогреве (расхолаживании) энергетической установки.

Вместе с тем конструкция опор не предусматривает возможности угловых перемещений ПГ относительно его продольной оси, что при разогреве энергетической установки приводит к появлению в узле сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком ПГ изгибающего момента (возникающее при этом осевое усилие сжатия оказывает несущественное влияние на НДС узла и в дальнейшем не рассматривается).

На рис. 4 показана упрощенная схема ГЦТ, используемая при расчете изгибающего момента. Термические удлинения вертикального участка ГЦТ ΔL и участка корпуса реактора между осью “горячей” ветви ГЦТ и опорным буртом корпуса ΔH при повышении температуры на величину $\Delta T = 300^\circ\text{C}$ (изменение температуры от комнатной до рабочей) вызывают изгиб горизонтального участка трубопровода. Поворот вертикального участка ГЦТ в плоскости его соединения с патрубком ПГ невозможен, так как ПГ не может вращаться относительно своей продольной оси, вследствие чего в узле сварного соединения возникает изгибающий момент M .

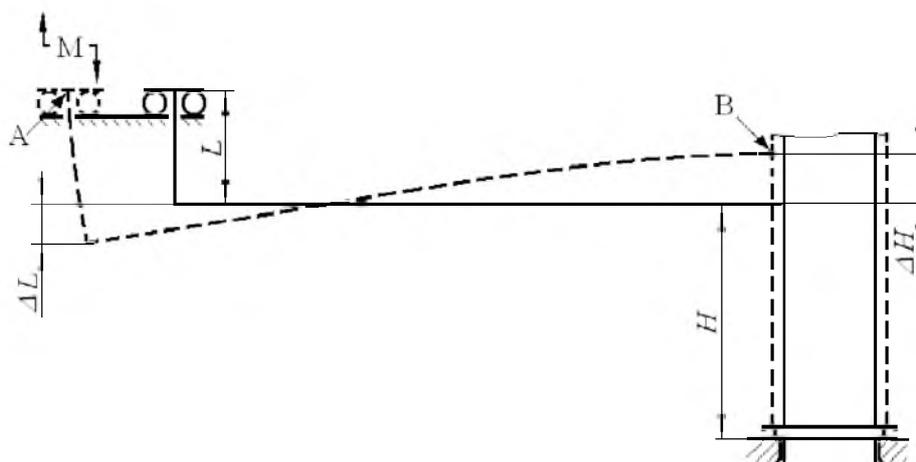


Рис. 4. Схема “горячей” ветви ГЦТ, используемая для расчета изгибающего момента в узле сварного соединения коллектора с патрубком ПГ, вызванного ее термическим расширением. (A – узел соединения коллектора с патрубком ПГ, B – узел соединения ГЦТ с патрубком корпуса реактора.)

Суммарное температурное удлинение участков ГЦТ и корпуса реактора будет $f = \alpha_{\text{ср}} \Delta T(L + H) = 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot 300 \cdot 4500 = 16,8 \text{ мм}$ ($\alpha_{\text{ср}}$ – средний температурный коэффициент линейного расширения металла). Дополнительные удлинения вертикального участка ГЦТ и корпуса реактора возникают в результате действия давления в первом контуре, однако ввиду их малости они в приводимых расчетах не учитывались (например, при ГИ на прочность давлением 25 МПа удлинение вертикального участка ГЦТ равно 0,1 мм).

Искомый изгибающий момент по результатам расчетов методами сопротивления материалов [4] для статически неопределимой системы (рис. 4) составляет

$$M = \frac{fEI}{L_1^2 \left(\frac{1}{6} + \frac{2L}{3L_1} \right)} = 2,7 \text{ МН} \cdot \text{м},$$

где E – модуль упругости; I – осевой момент инерции сечения трубы ГЦТ; L_1 – длина горизонтального участка ГЦТ (рис. 4).

С целью получения уточненной оценки изгибающего момента в узле сварного соединения выполнено численное моделирование поведения полной петли первого контура реактора, включая все ее элементы (корпус реактора, “горячую” и “холодную” ветвь ГЦТ, ГЦН, корпус ПГ, коллекторы, опоры – рис. 5), с учетом нагружения давлением и температуры. При этом использован специализированный вычислительный комплекс для расчетов трубопроводов сложной пространственной конфигурации, базирующийся на методе начальных параметров. Подробное описание и методика расчетов с помощью этого комплекса, а также условия, по которым определяются начальные параметры, приведены в [5].

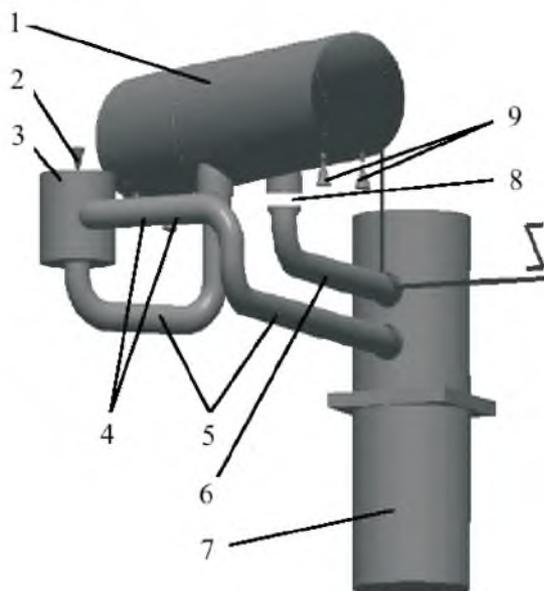


Рис. 5. Полная модель петли первого контура реактора: 1 – ПГ; 2, 4, 9 – опоры; 3 – ГЦН; 5 – “холодная” ветвь ГЦТ; 6 – “горячая” ветвь ГЦТ; 7 – корпус реактора; 8 – узел приварки коллектора к патрубку ПГ.

Особенность данного вычислительного комплекса состоит в возможности учета увеличения податливости гибов вследствие овализации сечения под действием внешних изгибающих моментов и внутреннего давления, что позволяет повысить точность получаемого решения. Для выполнения моделирования необходимо знать геометрию петли первого контура реактора, свойства материалов составляющих ее элементов, а также действующие нагрузки (давление, вес, изменение температуры от комнатной до рабочей – ΔT) и условия закрепления элементов петли (в данных расчетах опоры ограничивают перемещения элементов конструкции в вертикальном направлении). Результаты расчетов приведены в таблице.

Полученные уточненные данные о величине изгибающего момента в узле сварного соединения в плоскостигиба “горячей” ветви ГЦТ использовались при расчете НДС узла.

Результаты расчета изгибающего момента в узле сварного соединения

Режим	Давление p_1/p_2 , МПа	Изменение температуры ΔT , °С		M , МН·м
		в “горячей” ветви ГЦТ	в “холодной” ветви ГЦТ	
НУЭ	16/6	300	260	2,279
ГИ на прочность	25/11	110	110	1,082
ГИ на плотность	18/8	110	110	0,977
Испытания ГЦН	16/6	90	90	0,827

Расчет НДС узла сварного соединения. Определение НДС данного узла основано на положениях линейной теории упругости и теории малых упругопластических деформаций для трехмерных изотропных и кусочно-неоднородных тел. Решение краевых задач, базирующихся на этих теориях, осуществляется методом конечных элементов (МКЭ). Реализация трехмерного конечноэлементного моделирования на ПЭВМ была выполнена на базе смешанных вариационных постановок в программном обеспечении SPACe, автоматизирующем современную технологию проведения вычислительного эксперимента [6].

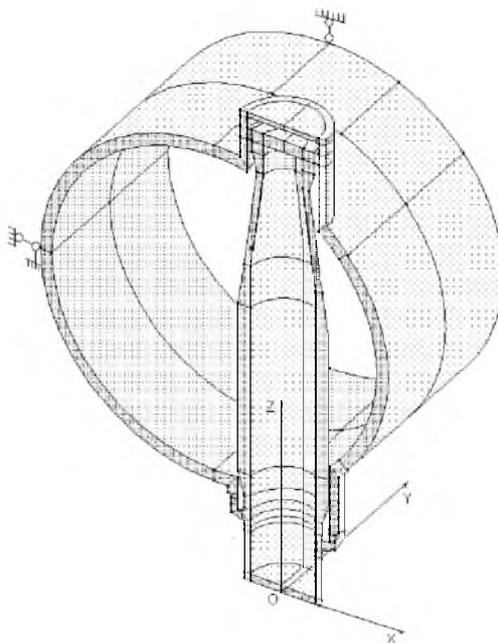


Рис. 6. Геометрическая модель ПГ с “горячим” коллектором (1/2 часть).

Геометрическую модель ПГ выбирали из условий обеспечения наиболее полного учета внешних силовых воздействий от оболочки корпуса ПГ и влияния “горячего” и “холодного” коллекторов на узел сварного соединения. Полагали, что нагрузки от веса внутреннего оборудования ПГ незначительны и ими можно пренебречь. Ниже приведены результаты расчетов для геометрической модели ПГ только с “горячим” коллектором (рис. 6).

Расчет с использованием модели с двумя коллекторами был выполнен для оценки взаимного влияния узлов сварного соединения “горячего” и “холодного” коллекторов при действии давления в коллекторах и корпусе ПГ. Установлено, что такое влияние практически отсутствует (различие в расчетах для модели с одним и двумя коллекторами не превышает 2%).

В качестве внешних воздействий на узел соединения рассматривались изгибающий момент, приложенный к нижнему торцу коллектора (рис. 6), и давление теплоносителей в коллекторе и ПГ, которое принималось в соответствии с режимами испытаний либо НУЭ.

Проверку расчетных схем осуществляли путем определения НДС при задании равномерного нагрева ($T = 300^\circ\text{C}$) по всем областям рассматриваемых моделей. Расчеты показали, что лишних связей модели не содержат.

Напряженно-деформированное состояние узла определяли для эксплуатационного режима и режимов испытаний – ГИ на прочность и плотность, а также испытаний ГЦН (таблица). Расчеты выполняли в линейной постановке, т.е. определяли условные упругие перемещения, деформации и напряжения, а НДС элемента конструкции получали суммированием результатов моделирования от отдельных нагрузок.

Результаты расчетов иллюстрируют рис. 7–10. На рис. 7 представлены данные о НДС в области “кармана” в случае действия давления теплоносителя в первом и втором контурах энергетической установки при ГИ и НУЭ без учета изгибающего момента, на рис. 8 – аналогичные результаты, полученные в случае действия изгибающих моментов, соответствующих двум режимам – НУЭ и ГИ на прочность (данные для других видов испытаний мало отличаются от приведенных и на рисунке не показаны).

Распределение напряжений в области “кармана” при совместном действии давления теплоносителя в первом и втором контурах ПГ и соответствующих изгибающих моментов иллюстрирует рис. 9.

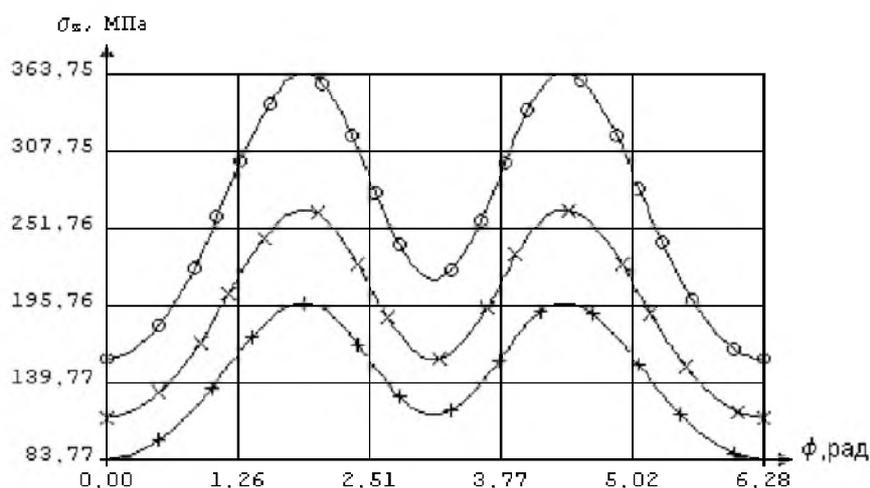


Рис. 7. Распределение по окружности патрубка ПГ напряжений σ_z , действующих на стенке “кармана” на высоте 20 мм от его дна, вызванное давлением в первом и втором контурах ПГ: + – $p_1 = 16$ МПа, $p_2 = 6$ МПа; × – $p_1 = 18$ МПа, $p_2 = 8$ МПа; ○ – $p_1 = 25$ МПа, $p_2 = 11$ МПа.

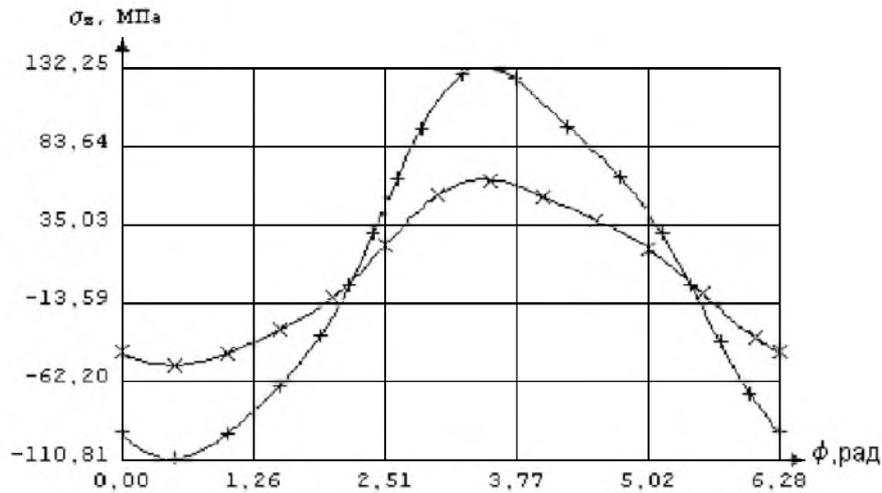


Рис. 8. Распределение по окружности патрубка ПГ напряжений σ_z , действующих на стенке “кармана” на высоте 20 мм от его дна, вызванное изгибающим моментом: + – $M = 2,279$ МН·м; × – $M = 1,082$ МН·м.

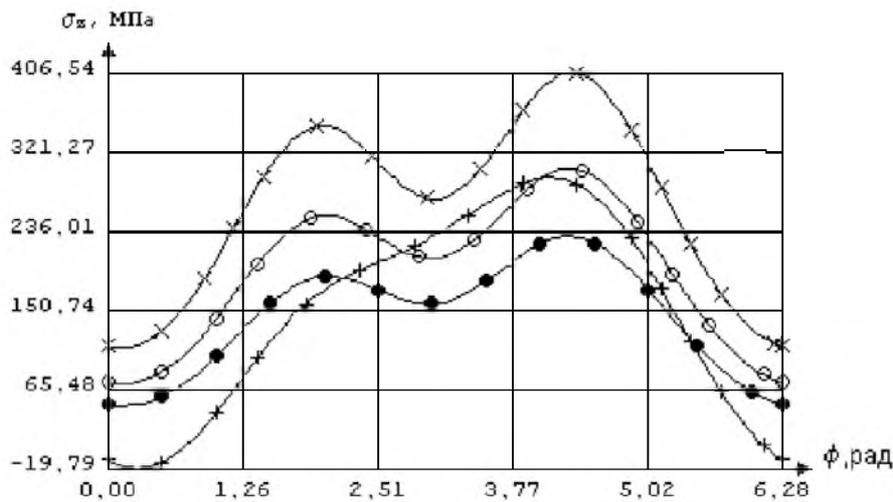


Рис. 9. Распределение по окружности патрубка ПГ напряжений σ_z , действующих на стенке “кармана” на высоте 20 мм от дна, вызванное совместным действием давления и изгибающего момента: + – $p_1 = 16$ МПа, $p_2 = 6$ МПа, $M = 2,279$ МН·м; × – $p_1 = 25$ МПа, $p_2 = 11$ МПа, $M = 1,082$ МН·м; ○ – $p_1 = 18$ МПа, $p_2 = 8$ МПа, $M = 0,977$ МН·м; ● – $p_1 = 16$ МПа, $p_2 = 6$ МПа, $M = 0,827$ МН·м.

С учетом действия изгибающих моментов максимумы напряжений как по величине, так и по расположению несколько изменяются, что особенно видно для режимов НУЭ.

Из расчетов следует, что наибольшее неблагоприятное влияние на НДС узла оказывает давление во втором контуре (в корпусе ПГ), вызывающее растягивающие напряжения в области “кармана”. Давление в первом контуре снижает уровень максимальных растягивающих напряжений на поверхности “кармана”, возникающих из-за давления во втором контуре.

Согласно результатам расчетов (рис. 10), максимальный уровень напряжений в области “кармана” отмечается ниже линии сопряжения галтели с внутренней цилиндрической поверхностью патрубка ПГ, что соответствует месту фактического разрушения (рис. 2).

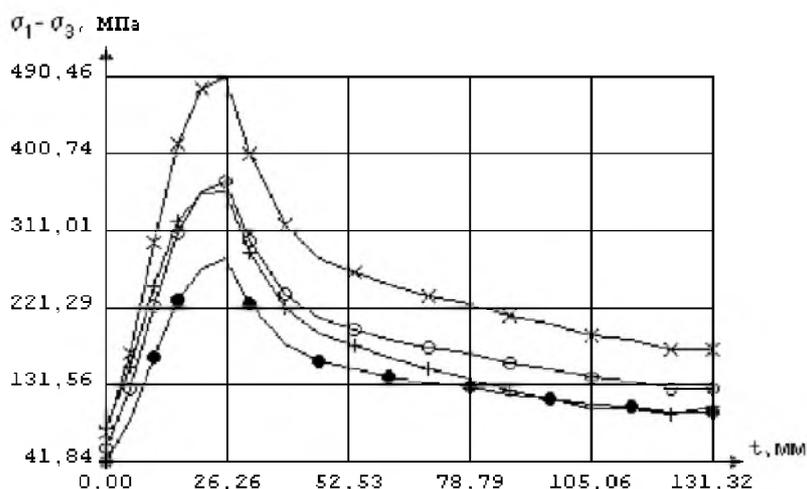


Рис. 10. Распределение напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$ на стенке “кармана” в области галтельного перехода, вызванное совместным действием давления и изгибающего момента: + – $p_1 = 16$ МПа, $p_2 = 6$ МПа, $M = 2,279$ МН·м, угол 4,10 рад; x – $p_1 = 25$ МПа, $p_2 = 11$ МПа, $M = 1,082$ МН·м, угол 4,32 рад; o – $p_1 = 18$ МПа, $p_2 = 8$ МПа, $M = 0,977$ МН·м, угол 4,32 рад; ● – $p_1 = 16$ МПа, $p_2 = 6$ МПа, $M = 0,827$ МН·м, угол 4,32 рад.

На рис. 11 приведено сопоставление численных расчетов с результатами натурных измерений НДС наружной поверхности узла в области сварного шва для эксплуатационного режима.

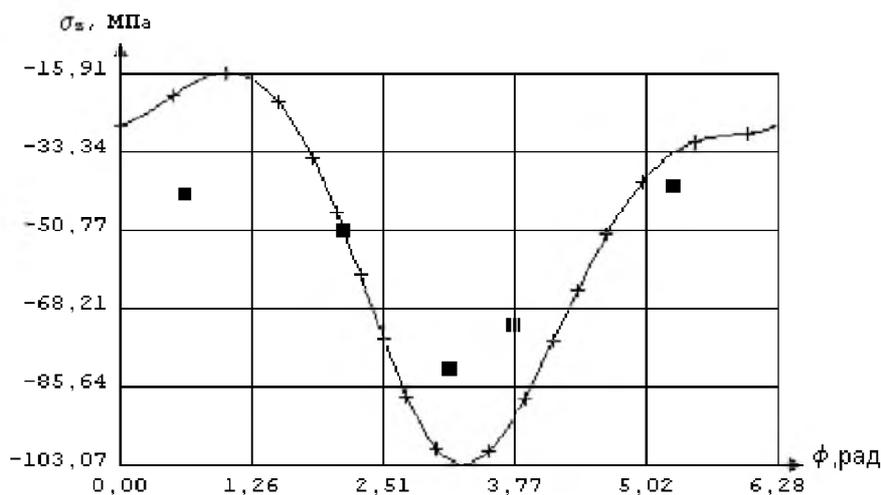


Рис. 11. Распределение по окружности патрубка ПГ напряжений σ_ϕ , действующих на его наружной поверхности в области установки датчиков деформации, вызванное совместным действием давления и изгибающего момента ($p_1 = 16$ МПа, $p_2 = 6$ МПа, $M = 2,279$ МН·м): + – численные расчеты; ■ – данные натурной тензометрии.

Измерения выполнялись с помощью многоканальной системы натурной тензо- и термометрии элементов конструкций [7]. Регистрирующая система, созданная на современной элементной базе, обеспечивала непрерывное измерение, накопление и хранение результатов. Система использовалась для регистрации упругих деформаций и температуры узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 в течение длительного периода времени между планово-предупредительными ремонтами. Проведенное сопоставление численных расчетов НДС и натурных измерений свидетельствует об их удовлетворительном соответствии. Это позволяет утверждать, что численное моделирование является достоверным..

Заключение. С использованием современных методов численных расчетов элементов конструкций на прочность и оборудования для натурной тензометрии уточнено НДС узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000. Определяющее влияние на НДС узла оказывают нагружение давлением теплоносителя в первом и втором контурах ПГ, а также изгибающий момент, вызванный термическим некомпенсированным расширением элементов петли первого контура энергетической установки и повышающий уровень максимальных растягивающих напряжений на поверхности “кармана”.

Расчетные значения напряжений на наружной поверхности узла (распределение осевого напряжения по окружности на уровне сварочного шва) удовлетворительно согласуются с данными натурных измерений, что подтверждает правильность выбора расчетных схем и достоверность получаемых результатов численного моделирования.

Максимальный уровень растягивающих напряжений наблюдается на поверхности “кармана” в локальной области ниже линии сопряжения галтели с внутренней цилиндрической поверхностью патрубка ПГ с растянутой стороныгиба трубопровода первого контура, что соответствует месту фактического разрушения на всех поврежденных ПГ.

При ГИ на прочность и плотность, а также при нормальных условиях эксплуатации максимальные растягивающие напряжения превышают предел текучести, что с учетом концентрации напряжений у дефектов от механической обработки и сварки приводит к пластической деформации, накопление которой при повторных циклах нагружения снижает ресурс пластичности металла, вызывая зарождение трещин.

Резюме

Наведено методику та основні результати уточненої оцінки напружено-деформованого стану вузла зварного з'єднання “горячого” колектора з корпусом парогенератора реактора ВВЕР-1000 АЕС за більш повного урахування умов навантаження при експлуатації. Враховано напруження, що виникають внаслідок некомпенсованого термічного розширення елементів енергетичної установки. За результатами розрахунків методом скінченних елементів із використанням тривимірної моделі рівень локальних напружень у вузлі перевищує границю текучості металу. Розрахункові напружен-

ня на зовнішній поверхні патрубків задовільно узгоджуються з результатами натурної тензометрії.

1. *Нормы* расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. *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. “Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”. – СПб., 2002. – 225 с.
3. *Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др.* Оценка термодинамического нагружения в узле приварки “горячего” коллектора к патрубки парогенератора ПГВ-1000 // Пробл. прочности. – 2002. – № 1. – С. 146 – 148.
4. *Соппротивление* материалов / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Вища шк., 1986. – 775 с.
5. *Орыняк И. В., Торон В. М., Ромащенко В. А., Жураховский В. Н.* Расчет пространственного разветвленного трубопровода в программном комплексе оценки прочности оборудования АЭС // Пробл. прочности. – 1998. – № 2. – С. 87 – 100.
6. *Програмне* забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)” // Система сертифікації Укр. СЕПРО. – Сертифікат відповідності № UA1.017.0084261-02.-2002.
7. *Романов С. В., Степанов Г. В., Харченко В. В. и др.* Многоканальная система тензо- и термометрии элементов конструкций // Пробл. прочности. – 2003. – № 4. – С. 143 – 147.

Поступила 27. 02. 2003