



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-213 ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ

В.М. ТОРОП, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Б.О. ЯХНО, НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, Пр-т Победы, 37.

E-mail: mmientu@kpi.kiev.ua

С целью определения зон дополнительного контроля основного металла и сварных соединений парогенераторов ПГВ-213 энергоблоков № 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС» выполнены расчеты на прочность при статических, циклических и сейсмических нагрузках. Построены конечно-элементные модели и с помощью коммерческого программного комплекса ABAQUS определено напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов парогенераторов ПГВ-213 при статических, циклических и сейсмических нагрузках. Оценка статической, циклической прочности и сейсмостойкости выполнена на основании требований ПНАЭ Г-7-002–86. Несмотря на выявленные локальные зоны превышения допускаемых напряжений в режиме нормальных условий эксплуатации парогенераторов энергоблоков № 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС» статическая, циклическая прочность и сейсмостойкость обеспечивается. Накопленное усталостное повреждение парогенератора за 30 лет эксплуатации составило 0,259, что значительно меньше 1 и определяет возможность его дальнейшей эксплуатации. Выявленные в результате выполненных расчетов на прочность потенциально опасные зоны максимальных растягивающих напряжений являются местами возможного возникновения дефектов и поэтому указанные зоны были рекомендованы службе контроля металла ОП «Ривненская АЭС» для проведения дополнительного периодического контроля. Библиогр. 5, табл. 3, рис. 8.

Ключевые слова: парогенератор ПГВ-213, статическая и циклическая прочность, сейсмостойкость

Большая часть потребляемой электрической энергии промышленностью Украины вырабатывается на энергоблоках атомных электростанций (АЭС), построенных еще в 1980-х годах. Назначенный проектный ресурс оборудования систем важных для безопасности (СВБ) АЭС составляет 30 лет. Одним из составляющих безопасной эксплуатации атомных энергоблоков в сверхпроектный период является мониторинг текущего технического состояния, прогнозирование остаточного ресурса данного типа оборудования, оценка соответствия оборудования требованиям современной нормативной документации (НД), обоснование объемов, периодичности и методов контроля основного металла и сварных соединений оборудования СВБ АЭС.

В АЭС с реакторами типа ВВЭР (водо-водяных энергетических реакторов) важнейшим элементом первого контура реакторной установки является парогенератор. В нем за счет тепла, получаемого в реакторе, вырабатывается пар, который потом используется как рабочее тело турбины для производства электроэнергии.

Выполнение расчетов на прочность при статических, циклических и сейсмических нагрузках парогенераторов энергоблоков № 1, 2 ОП РАЭС (Отдельное предприятие «Ривненская АЭС») необходимо для обеспечения требований действующих НД при обосновании продления сроков эксплуатации оборудования в сверхпроектный период.

© В. М. Тороп, Б. О. Яхно, 2013

Описание расчетной модели. На первом и втором энергоблоках ОП РАЭС с реакторами ВВЭР-440 установлены парогенераторы ПГВ-213 типов I и II, основные технические параметры которых приведены ниже.

Технические параметры парогенератора при номинальном режиме эксплуатации

Расчетное давление (абсолютное), МПа

- по первому контуру	13,7
- по второму контуру.....	5,5
Температура стенки корпуса, °С	270
Давление генерируемого пара, МПа	4,6
Температура генерируемого пара, °С	258...260
Температура питательной воды, °С	
- с включенным подогревателем высокого давления (ПВД)	223
- с отключенным ПВД.....	164
Температура теплоносителя, °С.....	
- на входе в парогенератор	297
- на выходе из парогенератора	270
Давление со стороны теплоносителя	
первого контура, МПа.....	12,3
Давление инспекторских гидравлических испытаний, МПа	
- по первому контуру	19,1
- по второму контуру.....	7,6
Температура воздуха в боксе, °С	60

Конструктивно (согласно инструкции по эксплуатации на парогенератор ПГВ-213, У 213-И-553) парогенераторы типа I и типа II идентичны, отличие их только в расположении коллекторов теплоносителя, люков лазов, штуцеров ДАПЭН (дополнительного аварийного питательного электронасоса) и длин подвесок.

Исходя из перечисленных выше отличий в типах парогенераторов и учитывая консервативный подход, для построения расчетной модели использованы следующие параметры:

- подвеска типа I длиной 9480 мм (консервативный подход при оценке сейсмостойкости парогенераторов);
- расчетная модель содержит штуцер ДАПЭН как в днище, так и в обечайке парогенератора (консервативный подход при оценке статической прочности).

Влияние типа парогенератора в расчетной модели не рассматривается, так как основное отличие заключается в том, что коллекторы теплоносителя меняют свое положение относительно горизонтальной продольной оси зеркально, патрубков подачи питательной воды также зеркально меняет свое положение относительно горизонтальной поперечной оси парогенератора, люк-лаз перемещается с правого днища на левое.

В горизонтальном направлении парогенератор закреплен на уровне своего центра тяжести с помо-

щью четырех гидроамортизаторов, установленных под углом 45° к корпусу и 90° по отношению один к другому, воспринимающих сейсмические нагрузки и допускающих свободное перемещение парогенератора в любом направлении при температурных расширениях оборудования. Таким образом, при построении расчетной модели влияние гидроамортизаторов учитывается только при определении собственных частот и сейсмических напряжений.

В вертикальной плоскости парогенератор удерживается с помощью четырех подвесок, шарнирно соединенных в нижней части с опорой и в верхней части с закладными деталями в боксе парогенератора. Также к парогенератору присоединены тросовые ограничители, которые притягивают парогенератор к полу.

Расчетная геометрическая модель и граничные условия парогенератора созданы с учетом технической документации и изложенных выше допущений приведены на рис. 1. Механические свойства материалов парогенератора соответствуют НД [1]. Спектр ответа для максимального расчет-

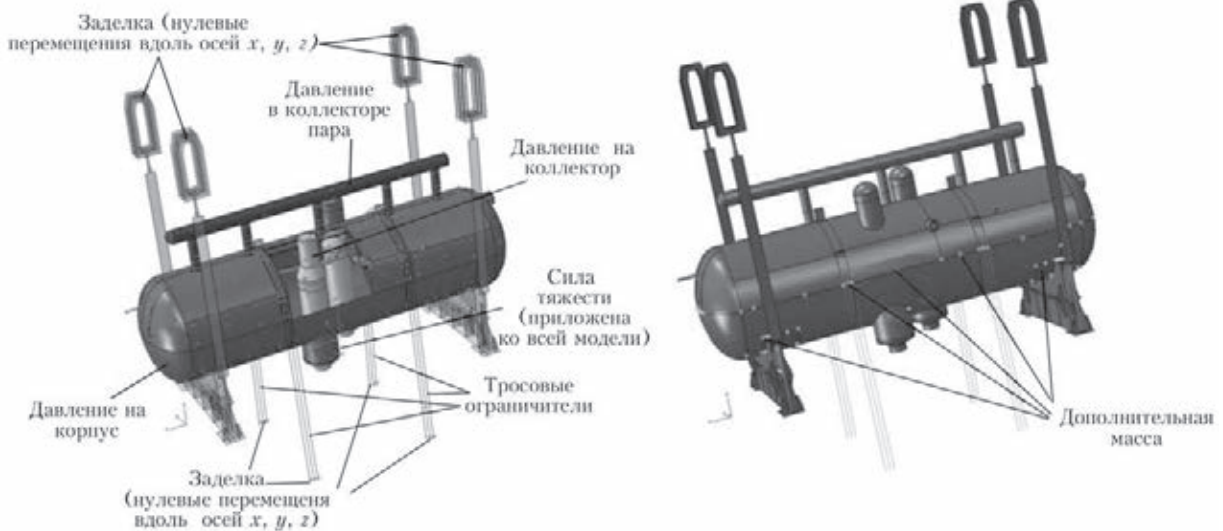


Рис. 1 Модель парогенератора, граничные условия и прикладываемые нагрузки

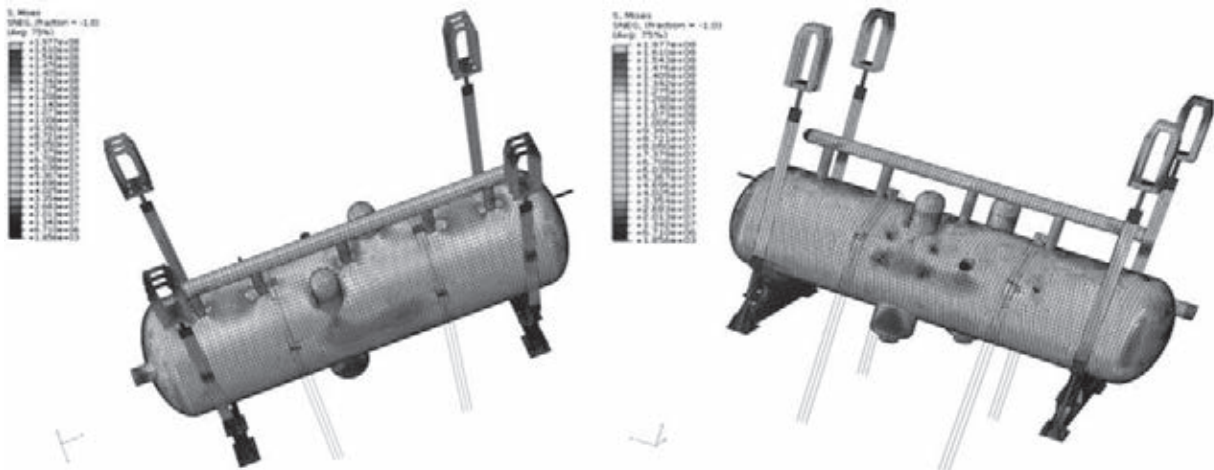


Рис. 2. Результаты расчета НДС в парогенераторе



ного землетрясения (МРЗ) величиной 6 баллов приведен ниже:

$a, \text{м/с}^2$	1,6	2,8	6,3	6,3	2,8	1,6	1,6	2,4	2,4	1,1	0,68	0,56	0,56
$f, \text{Гц}$	0,5	3	4	6	7	12	15	17	20	22	24	28	32

В процессе эксплуатации парогенератор нагружен внутренним давлением, весовыми нагрузками и усилиями, возникающими от температурного расширения различных конструктивных элементов.

Согласно рекомендациям [1], приведенные напряжения (для заданной температуры) определяются как сумма мембранных и изгибных напряжений от механических нагрузок, воздействующих на конструкцию парогенератора. Напряжения, возникающие в результате температурного расширения, учитываются при расчете на циклическую прочность путем оценки напряженного состояния по размаху приведенных напряжений.

Основными несущими элементами являются корпус парогенератора и коллектор первого контура. Масса воды в парогенераторе при номинальном уровне и номинальной мощности составляет 33 т, масса воды в полностью заполненном парогенераторе – 62 т. В расчетной модели эта масса равномерно распределена по поверхности нижней части корпуса парогенератора.

Опоры парогенератора с помощью шарнирных подвесок крепятся к закладным балкам. Кроме того, парогенератор удерживают тросовые ограничители, притягивающие его к полу.

В местах присоединения подвесок к тегалам был реализован шарнир – отпущена степень свободы – поворот относительно оси x , а в местах соединения тегал с нижней опорой и резьбовыми толрепами – отпущены степени свободы – повороты относительно осей x, y, z .

Кроме того, для патрубка коллектора пара и коллектора первого контура были созданы твердотельные расчетные модели, позволяющие более точно оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) в наиболее нагруженных местах парогенератора.

Результаты расчета. В результате упругопластического расчета на статическую прочность методом конечных элементов с применением коммерческого

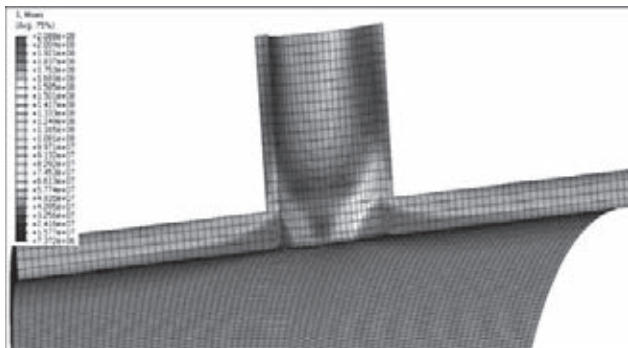


Рис. 3. Распределение НДС вблизи патрубка корпуса парогенератора

комплекса ABAQUS (рис. 2–4) было установлено, что максимальные напряжения от механических нагрузок в корпусе парогенератора возникают в районе патрубков коллектора пара и коллектора первого контура. Результаты анализа выполнения условий статической прочности приведены в табл. 1, 2 для каждого из использованных в парогенераторе материалов. Приведенные максимальные напряжения по Мизесу превышают установленные в [1] допускаемые напряжения при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) и поэтому указанные на рис. 2–4 зоны максимальных растягивающих напряжений являются потенциально опасными местами возможного зарождения дефектов и эти зоны следует дополнительно контролировать средствами неразрушающего контроля. Однако следует отметить, что в режиме гидроиспытаний (ГИ) нарушения нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) и аварийных ситуациях (АС), приведенные напряжения в этих областях не превышают допускаемые для соответствующих режимов.

Следует отметить, что при расчете на статическую прочность была также выявлена наиболее нагруженная область в районе сварного шва № 76. В этой области имеют взаимодействие материалы с разным коэффициентом температурного расширения. Для этой области был проведен термоупругопластический расчет от действия температурных нагрузок на твердотельной модели, результаты которого представлены на рис. 5–6.

Результаты расчета от действия механических нагрузок в зоне сварного шва № 76 представлены на рис. 6. Как видно из рис. 5, б и рис. 6 зоны концентрации максимальных напряжений от действия температуры и давления не совпадают. Размах температурных напряжений в зоне сварного шва № 76 составляет 196 МПа, а напряжений от действия дав-

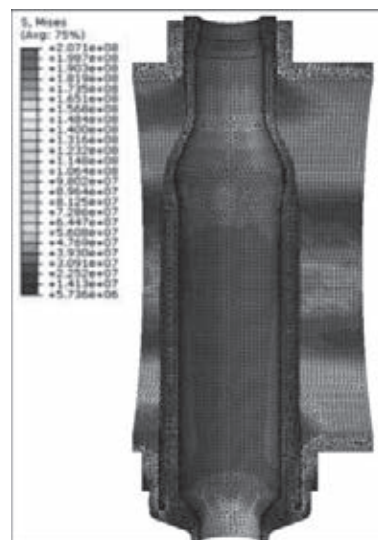


Рис. 4. Результаты расчета НДС в коллекторе пара парогенератора

ления 57 МПа, что дает максимальный суммарный размах приведенных напряжений порядка 253 МПа (амплитудные напряжения 126,5 МПа).

Холодный и горячий коллекторы первого контура в центральной части представляют собой толстостенные перфорированные цилиндры с внешним диаметром 1072 мм, толщиной стенки 136 мм и диаметром перфорирующих отвер-

стий 13,2 мм (с учетом толщины теплообменных трубок).

В связи с тем, что распределение напряжений в коллекторе первого контура циклически симметрично, возможно рассмотрение в расчетной модели не целого цилиндра, а некоторой его части с применением соответствующих граничных условий. Так, при решении задачи с помощью объемных конеч-

Таблица 1. Результаты расчета при различных условиях эксплуатации

Марка стали	Пиковые максимальные расчетные напряжения (по Мизесу), МПа	$[\sigma]_2$, МПа (при заданной температуре), °С	Условие статической прочности
При нормальных условиях			
22К	209 (корпус парогенератора)	161 (300)	Не выполняется
08Х18Н10Т	120 (коллектор)	148 (300)	Выполняется
20	147 (коллектор пара)	153 (300)	-
20К	158 (подвески)	178 (150)	-
30ХМА	194 (тяги)	295 (150)	-
Зсп5	151 (нижние опоры)	177 (150)	-
При гидроиспытаниях второго контура			
22К	217 (корпус парогенератора)	222 (100)	Выполняется
08Х18Н10Т	76 (коллектор)	211 (150)	-
20	175 (коллектор пара)	233 (150)	-
20К	180 (подвески)	233 (150)	-
30ХМА	223 (тяги)	385 (150)	-
Зсп5	174 (нижние опоры)	231 (150)	-
При гидроиспытаниях первого контура			
22К	208 (корпус парогенератора)	211 (150)	Выполняется
08Х18Н10Т	133 (коллектор)	211 (150)	-
20	156 (коллектор пара)	233 (150)	-
20К	120 (подвески)	233 (150)	-
30ХМА	123 (тяги)	385 (150)	-
Зсп5	92 (нижние опоры)	231 (150)	-

Таблица 2. Результаты расчета при нарушении нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) и аварийных ситуациях (АС)

Марка стали	Пиковые максимальные расчетные напряжения (по Мизесу), МПа	$[\sigma]_2^{\text{ННУЭ}}$, МПа (при заданной температуре), °С	$[\sigma]_2^{\text{АС}}$, МПа (при заданной температуре), °С	Условие прочности при ННУЭ/АС
22К	211 (максимальные в элементе) 200 (средние по толщине стенки) (корпус парогенератора)	198 (300)	223 (300)	Не выполняется/ выполняется
08Х18Н10Т	140 (коллектор)	178 (350)	200 (350)	Выполняется/выполняется
20	170 (коллектор пара)	189 (300)	212 (300)	-
20К	146 (подвески)	189 (300)	212 (300)	-
30ХМА	177 (тяги)	338 (300)	380 (300)	-
Зсп5	145 (нижние опоры)	168 (300)	189 (300)	-

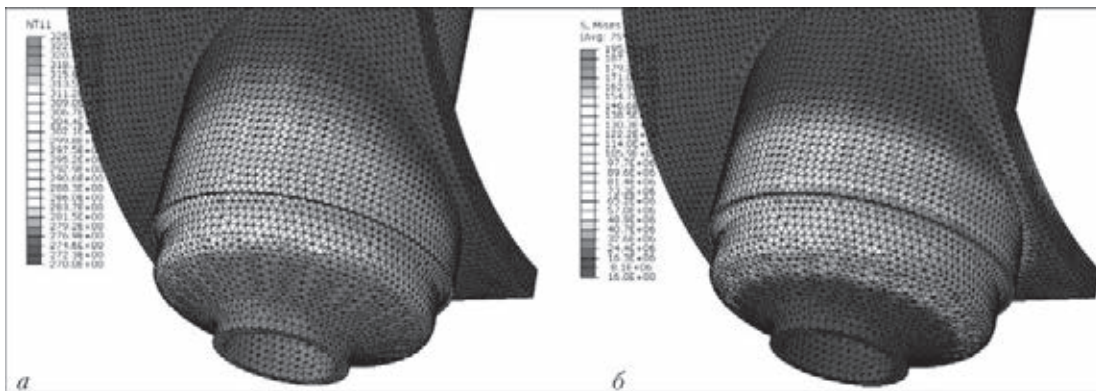


Рис. 5. Распределение температуры (а) и размах температурных напряжений (б) в зоне сварного шва № 76

ных элементов целесообразно рассматривать часть перфорированной стенки. Рассматривался режим гидроиспытаний, как наиболее опасный, при котором внутреннее давление на стенку коллектора и давление внутри перфорирующих отверстий принималось равным 19,1 МПа, а наружное давление (на стенку коллектора) 4,6 МПа.

Результаты расчета приведены на рис. 7. Возникающие в перфорирующих отверстия напряжения характеризуются неоднородным распределением, что

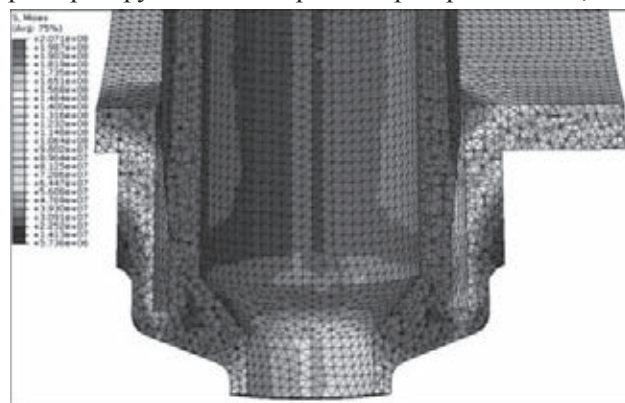
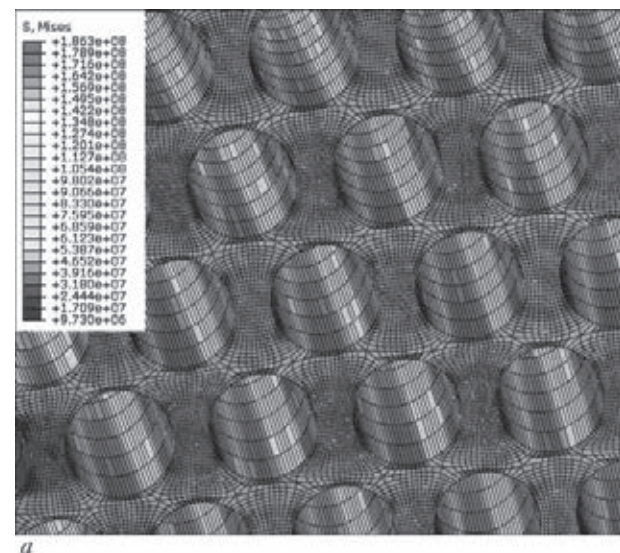


Рис. 6. Размах напряжений в зоне сварного шва № 76 от действия внутреннего давления



свидетельствует о концентрации напряжений. При этом максимум напряжений убывает от внутренней поверхности стенки коллектора к внешней. И хотя максимальные напряжения не превышают предела текучести и допускаемых напряжений при гидроиспытаниях, указанные на рис. 7 зоны концентрации максимальных растягивающих напряжений следует принимать во внимание при проведении периодического неразрушающего контроля металла, который, как правило, проводится токовихревым методом.

При нормальных условиях эксплуатации в местах максимальных напряжений возникают небольшие пластические деформации, влияние которых на расчетный ресурс и повреждаемость парогенератора рассматривается в расчете на циклическую прочность.

При расчете на циклическую прочность было выделено несколько огибающих для режимов нарушения нормальных условий эксплуатации и аварийных ситуаций, а именно группа «Расчетные параметры», «Увеличение теплоотвода через второй контур», «Уменьшение расхода теплоносителя первого контура», «Гидроиспытания», «Уменьшение массы теплоносителя первого контура» и

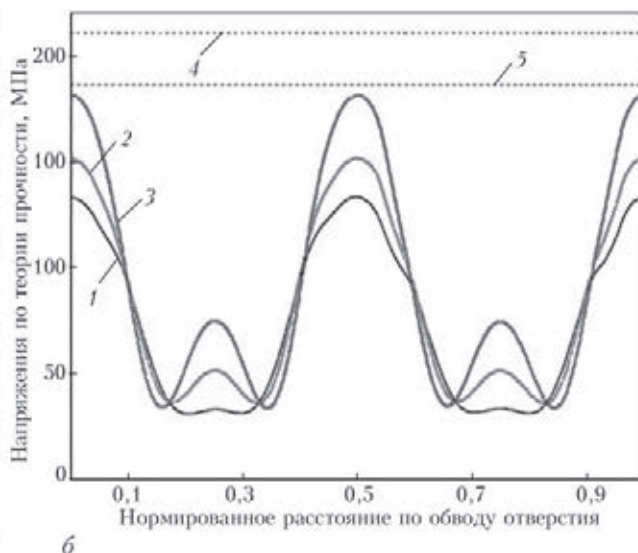


Рис. 7. Распределение напряжений по обводу перфорирующего отверстия: а – эквивалентные напряжения по Мизесу; б – эпюры напряжений (1 – внешняя поверхность; 2 – средняя; 3 – внутренняя; 4 – допускаемое напряжение при ГИ; 5 – предел текучести при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Таблица 3. Абсолютные значения приведенных напряжений

Деталь парогенератора	Марка стали	Напряжения при МРЗ, МПа	Напряжения при НУЭ, МПа	Напряжения НУЭ+МРЗ, МПа	$[\sigma]_2^{\text{сейсм}}$, МПа
Корпус ПГ, место крепления гидроамортизатора	22К	60	100	160	223
Подвеска ПГ	20К	40	100	140	212
Гиб трубопровода подачи питательной воды	20	60	30	90	212
Патрубок коллектора пара	22К	5	198	203	223
Соединение патрубка Ду 1100 с корпусом	22К	5	185	200	223
Соединение патрубка Ду 720 с корпусом	22К	15	161	176	223

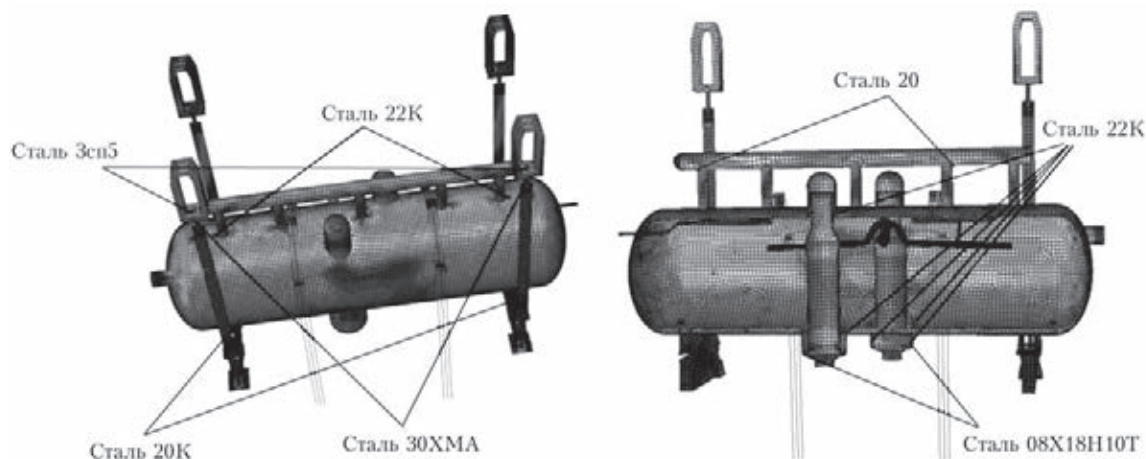


Рис. 8. Зоны максимальных напряжений для различных материалов, которые являются потенциально опасными зонами возможного зарождения дефектов в парогенераторах ПГВ-213

проведена оценка накопленного усталостного повреждения парогенератора, в результате которого ожидаемое общее усталостное повреждение парогенератора составило 0,259.

Сейсмический расчет проводили с помощью линейно-спектрального метода. При расчете на сейсмическую прочность сейсмические нагрузки прикладывались одновременно в трех взаимно перпендикулярных направлениях и суммировались по правилу квадратного корня из сумм квадратов от каждого воздействия. Для каждого из направлений использовался обобщенный спектр отклика, приведенный выше. Для вертикальной составляющей использовался спектр отклика, умноженный на коэффициент $(0,67 = 2/3)$. Максимальные сейсмические напряжения для максимального расчетного землетрясения (МРЗ) возникают в области присоединения гидроамортизаторов и в подвесках парогенератора, а их абсолютные значения приведены в табл. 3, из которой следует, что сейсмостойкость парогенератора обеспечена.

По результатам анализа статической, циклической прочности и сейсмостойкости парогенераторов ПГВ-213 энергоблоков № 1, 2 ОП «Ривненская АЭС» на рис. 8 представлены зоны максимальных растягивающих напряжений, которые являются потенциально опасными местами возможного зарождения дефектов и эти зоны следует дополнительно контролировать

средствами неразрушающего контроля как при оценке технического состояния, так и при проведении регламентных работ по периодическому контролю металла.

Выводы

Несмотря на некоторые локальные превышения допускаемых напряжений в режиме нормальных условий эксплуатации парогенераторов ПГВ-213 энергоблоков № 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС» статическая, циклическая прочность и сейсмостойкость обеспечивается.

Накопленное усталостное повреждение парогенераторов ПГВ-213 за 30 лет эксплуатации не превышает 0,259, что значительно меньше 1 и определяет возможность их дальнейшей эксплуатации.

Выявленные в результате выполненных расчетов на прочность и представленные на рис. 8 потенциально опасные зоны максимальных растягивающих напряжений, которые являются местами возможного возникновения дефектов, были рекомендованы службе контроля металла ОП «Ривненская АЭС» для проведения дополнительного периодического обследования.

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоиздат, 1989. – 525 с.

2. *Повышение безопасности и продление срока эксплуатации энергоблоков 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС». Итоговый отчет.* – Киев: 2011. – 194 с.
3. *Григорюк Э. И., Фильштинский Л. А.* Перфорированные пластины и оболочки. – М.: Наука, 1970. – 556 с.
4. *Зарубин В. С., Станкевич И. В.* Расчет теплонапряженных конструкций. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
5. *Зенкевич О. С.* Метод конечных элементов в технике – М.: Мир, 1975. – 542 с.

In order to determine the zones of additional monitoring of base metal and welded joints of steam generators PGV-213 of power units #1 and 2 of JC “Rivnenskaya NPP” strength analysis at static, cyclic and seismic loads was performed. Finite-element models were plotted and commercial software complex ABACUS was used to determine the stress-strain state of structural elements of steam generators PGV-213 at static, cyclic and seismic loads. Evaluation of static and cyclic strength and seismic resistance was performed on the basis of PNE G-7-002-86 requirements. Despite the revealed local zones of exceeding the admissible stresses in the mode of normal operation conditions of power units #1 and 2 of JC “Rivnenskaya NPP”, the static, cyclic strength and seismic resistance is guaranteed. Accumulated fatigue damage of steam generators over 30 years of operation was equal to 0.259 that is much less than 1, and determines the possibility of its further operation. Potentially hazardous zones of maximum tensile stresses revealed as a result of performed calculations, are the locations of possible initiation of defects, and, therefore, the above zones were recommended for metal inspection service of JC “Rivnenskaya NPP” to conduct additional periodical control. 5 References.

Keywords: steam generator PGV-213, static and cyclic strength, seismic resistance

*Поступила в редакцию
20.03.2013*

18-я Сессия Научного совета по новым материалам

16–17 мая 2013 г. в Киеве в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины состоялась 18-я Сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по естественным наукам Международной ассоциации академий наук (МААН). Тематика сессии «**Нанотехнологии и наноматериалы**».

В заседании Научного совета приняли участие более 100 ученых и специалистов в области материаловедения от академий наук, вузов и предприятий Беларуси, России и Украины.

16 мая, в первый день работы Научного совета, прошли заседания секций «*Полимерные материалы*» и «*Конструкционные и функциональные наноматериалы для медицины*». На секциях были заслушаны и обсуждены научные доклады, в которых представлены результаты исследований, связанные с получением наноразмерных частиц, изучением их взаимодействия со средой, формированием структур, изучением их свойств и созданием на этой базе нанотехнологий, которые позволяют получать материалы с уникальными характеристиками.

17 мая состоялось пленарное заседание Научного совета, которое открыл его председатель, президент МААН, президент НАН Украины, директор ИЭС им. Е.О. Патона академик Б.Е. Патон. Борис Евгеньевич напомнил, что в сентябре 2013 г. исполняется 20 лет со дня учреждения Международной ассоциации академий наук. За два десятилетия МААН стала авторитетной в СНГ и мире организацией. Она имеет официальные партнерские отношения с ЮНЕСКО, статус наблюдателя при Межпарламентской ассамблее СНГ. Инициативы МААН по развитию научного сотрудничества в СНГ в области фундаментальной и прикладной науки, по созданию в Содружестве общего научного пространства рассматривались на саммитах СНГ. Одно из важных направлений в деятельности МААН – взаимовыгодное сотрудничество ученых стран СНГ в области медицины.

При МААН создано 12 научных советов по отдельным проблемам и направлениям. Следует отметить, что первым, еще в 1995 г., был создан Научный совет по новым материалам.

Далее академик Б.Е. Патон ознакомил участников сессии с программой и регламентом работы пленарного заседания, на который было представлено 10 докладов.

В заключение работы сессии академик Б.Е. Патон сказал, что в сентябре 2013 г. планируется проведение юбилейной сессии МААН. В мире сейчас большое внимание уделяется развитию фундаментальных исследований в медицине. Для МААН, по-видимому, такие исследования тоже должны стать приоритетными. Необходимо сосредоточить усилия и средства на главных, наиболее важных направлениях, что позволит нам выйти на передовые позиции в мире хотя бы по некоторым направлениям. Б.Е. Патон поблагодарил докладчиков и участников сессии за плодотворную работу и пожелал им успехов в дальнейшей работе.

Участники сессии имели возможность в ходе дискуссии обменяться мнениями о прочитанных докладах, о состоянии работ в области разработки новых материалов в своих странах, оценить работу Научного совета по новым материалам, высказать пожелания по ее улучшению. Проводимые ежегодно Сессии Научного совета по новым материалам МААН позволяют сохранять и развивать творческие связи между учеными разных стран, способствуют интенсификации информационного обмена между ними.

