

П.З.Луговой¹, А.П.Шугайло², Я.Д.Круглий²,
А.М.Колупаев²

ВЛИЯНИЕ СЛОЯ ШЛАМА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРА

¹Институт механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины,
ул. Нестерова, 3, 03057, г. Киев, Украина; e-mail:plugovyy@inmech.kiev.ua

²Государственный научно-технический центр
по ядерной и радиационной безопасности,
ул. Василя Стуса, 35 - 37, 03142, г. Киев, Украина; e-mail:ap_shugaylo@sstc.com.ua

Abstract. Abstract. During operation of the steam generator (SG), the pollution of heat exchange tubes (HET) and surface of the SG by the slime is happened owing to features of water-chemical and temperature conditions. The accumulation of slime can influence on behavior of HET in the form of formation the additional mass on its surface and limit the possibility of free movement in the places of fastening of HET and change their thickness. In conditions of maximally close to the real ones, the influence of slime on the factors shown above is studied.

Key words: slime, steam generator, heat exchange tube, stress-strain state.

Введение.

Особенности конструкции парогенератора (ПГ). ПГ предназначены для выработки насыщенного пара в составе энергоблока атомной электростанции (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором и являются сложной оболочечной конструкцией, состоящей из большого количества трубных элементов и змеевиков, заключенных в цилиндрический корпус, имеющий два коллектора [9]. На АЭС ПГ относятся к оборудованию, важному для безопасности энергоблока. Создание ПГ исключительно сложная и ответственная задача, требующая высокого качества проектирования и объединяющая в себе знания о конструкционных материалах, их сочетании и поведении в условиях существенных перепадов давления и температуры. Недостатки проектирования потенциально могут приводить к авариям и выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду. Традиционно при проведении проектных расчетов ПГ на прочность используются теории пластин и оболочек [2, 5, 10, 11, 13 – 16].

Эти методики позволяют получить достаточно точные аналитические решения. Но слово «точный», на самом деле, более корректно внести в кавычки, поскольку данные расчеты всегда сопряжены с использованием большого количества упрощений и гипотез. Так, достаточно часто не учитываются утонения теплообменных труб (ТОТ), схематически изображаются шламовые отложения на ТОТ ПГ, упрощенно моделируется факт предварительного напряжения и физическая нелинейность в поведении цилиндрических труб. Ниже приведены результаты теоретической оценки влияния шламовых отложений и утонения ТОТ на формирование напряженно-деформированного состояния ТОТ на примере наиболее распространенных в Украине ПГВ-1000М [6].

ПГ ПГВ-1000М (рис. 1) представляет собой горизонтальный, однокорпусный, с погруженной поверхностью теплообмена из горизонтально расположенных труб, со

встроенными паросепарационными устройствами, системой раздачи питательной воды, паровым коллектором, с погруженным дырчатым листом. На рис. 1 отмечены следующие важные компоненты ПГ: 1 – теплопередающая поверхность первого контура; 2 – устройство раздачи аварийной питательной воды; 3 – устройство раздачи основной питательной воды; 4 – пароотводящая система; 5 – сепарационное устройство; 6 – устройство выравнивания паровой нагрузки, ХК – холодный коллектор, ГК – горячий коллектор.

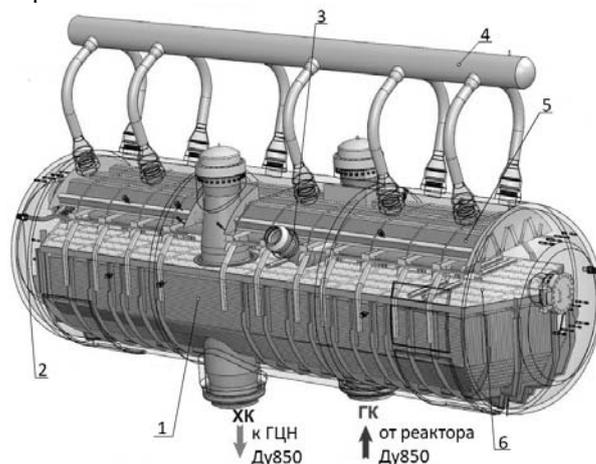


Рис. 1

ПГ предназначен для выработки сухого насыщенного пара в составе энергоблока АЭС с водо-водяным энергетическим реактором ВВЭР-1000. ПГ является двухконтурным и вырабатывает сухой насыщенный пар, образуемый в результате теплосъема с ТОТ, внутри которых находится радиоактивная среда первого контура. По сути ПГ является физическим барьером между первым (радиоактивным) и вторым (чистым) контуром. Нарушение целостности ТОТ может привести к перемешиванию теплоносителя (радиоактивного) первого контура и второго (чистого) контура с последующим загрязнением оборудования и выбросами в окружающую среду.

ПГ обеспечивает подачу сухого насыщенного пара на турбину под давлением 64 кг/см^2 при температуре $278,5^\circ\text{C}$ с влажностью $< 0,2\%$. Двухконтурная схема ПГ позволяет использовать энергию, отведенную от ядерного топлива, в то же время поддерживая радиоактивную чистоту пара.

Конструктивное исполнение ПГ обеспечивает надежное расхолаживание реактора при минимальных разностях высотных отметок между ПГ и реактором. Он поддерживает требуемый уровень температур теплоносителя первого контура во всех проектных режимах.

Основными компонентами парогенератора являются: «горячий» и «холодный» коллекторы теплоносителя первого контура; пучок U-образных ТОТ (поверхность теплообмена); опорные конструкции ТОТ, которые ограничивают перемещения ТОТ в вертикальном направлении и позволяют свободно перемещаться в горизонтальном.

Теплоноситель первого контура служит источником тепла для ПГ, он проходит по ПГ со стороны первого контура, как описано ниже. Сначала теплоноситель первого контура нагревается в реакторе и поступает в ПГ через «горячий» коллектор с температурой $320^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Из «горячего» коллектора теплоноситель раздается по 11000 ТОТ диаметром 16 мм с толщиной стенки 1,5мм. ТОТ, гнутые в U-образные змеевики, скомпонованы в трубный пучок. На рис. 2 показана схема расположения ТОТ, составленная на основе комплекта чертежей завода изготовителя, и преобладающие зоны (1, 2) скопления шлама (позиция 1 – треугольник, позиция 2 – прямоугольник).

Пучок ТОТ расположен в нижней половине ПГ и остается погруженным во время нормальной эксплуатации и действует как поверхность теплообмена. Через трубный пучок тепло, выработанное реактором, передается питательной воде, производящей пар. После прохождения через ТОТ теплоноситель первого контура выходит в «холодный» коллектор. На этом участке перепад температуры теплоносителя первого контура по ПГ составляет 34°C , так как температура в «холодном» коллекторе – $288^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Из «холодного» коллектора теплоноситель поступает на всас главного циркуляционного насоса, который направляет его обратно в реактор, где теплоноситель снова нагревается, и цикл повторяется.

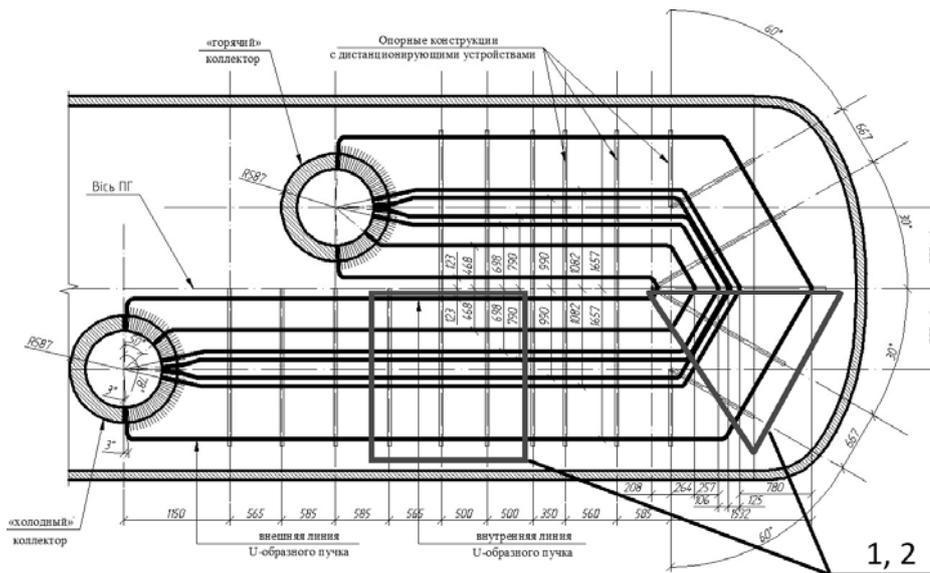


Рис. 2

Опыт эксплуатации, а также ряд исследований, в частности [1, 3, 7] показывает, что основным фактором, влияющим на работоспособность трубчатки ПГ, является водно-химический режим (ВХР). ПГ РУ ВВЭР эксплуатируются в тяжелых коррозионных условиях. Поэтому наблюдаются значительные различия в работоспособности трубчатки на ПГ различных энергоблоков, а в отдельных случаях даже в пределах одного энергоблока.

§1. Постановка задачи.

В середине 90-х годов массовое повреждение ТОТ ПГВ-1000М было зафиксировано на энергоблоке № 2 Балаковской АЭС в районе второй-четвертой дистанционирующих решеток от горячего коллектора в сторону «холодного» торца, где при визуальном обследовании трубчатки ПГ было выявлено локальное накопление шламовых отложений (рис. 2, позиции 1, 2). Выполненная при обследовании видеосъемка показала наличие локальных зон скопления шлама.

Металлографические исследования образцов ТОТ, вырезанных из различных ПГ АЭС с ВВЭР-1000, свидетельствует о том, что, как правило, причиной повреждения ТОТ является недопустимый уровень удельной загрязненности отложениями (локально до $1000 \dots 2000 \text{ г/м}^2$ при допустимой величине $100 \dots 150 \text{ г/м}^2$). При наличии таких отложений на ТОТ, вопрос может состоять только в том, насколько будет длителен период до их повреждения. О повреждениях ТОТ ПГ АЭС с ВВЭР-1000 на действующих украинских энергоблоках можно судить по количеству заглушенных труб [4]. На рис. 3 приведена зависимость количества заглушенных ТОТ ПГ АЭС Украины от средней расчетной удельной загрязненности по длине ТОТ к моменту проведения первой химической промывки, в зависимости от срока эксплуатации.

Из рис. 3 также следует, что накопление отложений со средней удельной загрязненностью более 150 г/м^2 приводит к повреждениям ТОТ ПГ, и чем выше загрязненность, тем больше количество заглушенных труб на этом ПГ. Этот факт позволяет обоснованно предположить, что коренной причиной повреждений ТОТ могут являться условия эксплуатации ПГ, а определяющим фактором – недопустимый уровень удельной загрязненности шламом ТОТ ПГ.

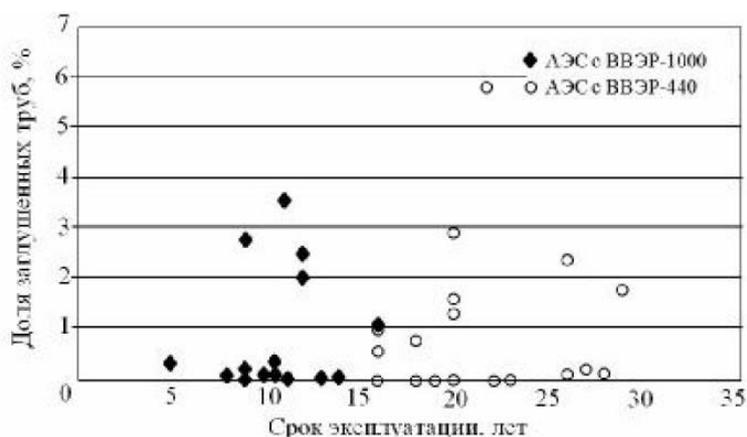


Рис. 3

Процесс накопления шлама на ТОТ изменяет их толщину (потеря материала), условия их опирания и, соответственно, заложенная в проекте возможность их перемещения существенно изменяется, приводя тем самым к непроектному закреплению и образованию локальных зон с высоким уровнем напряжений, который, в свою очередь, совместно с уменьшением толщины стенки может приводить к нарушению целостности ТОТ и, соответственно, перемешиванию «грязного» и «чистого» теплоносителя. Для определения областей этих изменений выполнен анализ состояния окружающей среды ТОТ и оценка ее влияния на процессы образования локальных загрязнений и оседания шлама на ТОТ (рис. 2, позиции 1, 2).

В процессе эксплуатации ПГВ-1000М были выявлены различные случаи их повреждения. В период с 1986 по 1991 годы наблюдалось повреждение металла холодных коллекторов ПГВ-1000М в перемычках между отверстиями в перфорированной зоне. В период с 1997 по 2014 годы наблюдалось массовое повреждение ТОТ во второй полуокружности в зоне между первой и четвертой дистанционирующими решетками от ГК (рис. 2, позиции 1, 2). Всего на АЭС Украины заменено 30 ПГ, из них 18 – на ЮУАЭС, 12 – на ЗАЭС. Срок службы до замены составлял от 2-х до 13 лет. Зависимость доли заглушенных ТОТ от срока эксплуатации представлена на рис. 3.

Для определения зон максимального скопления шлама собраны и обработаны статистические данные о заглушенных ТОТ 24 ПГ ЗАЭС в период с 1991 по 2010 гг. Особенный интерес представляют участки, расположенные во второй полуокружности ПГ в зоне максимального скопления шламовых отложений между 2-й и 4-й дистанционирующими решетками от горячего коллектора и далее к холодному торцу (см. рис. 2, позиции 1, 2). Причинами образования зоны максимального скопления шлама между 2-й и 4-й решетками от горячего коллектора второй полуокружности парогенераторов являются наличие высоких температурных напряжений и низких скоростей циркуляции котловой воды в этой зоне, низкая эффективность вывода шламовых отложений.

На рис. 4 представлена средняя удельная загрязненность ТОТ к моменту первой химической отмывки, г/м^2 .

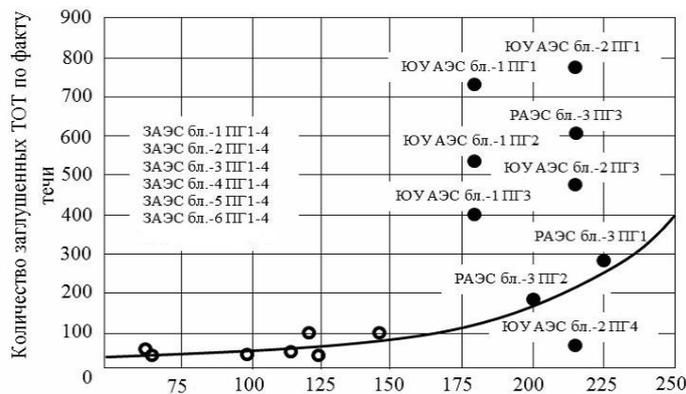


Рис. 4

На рис. 4 введены обозначения: «⁰» – допустимая величина удельной загрязненности ТОТ, «^{*}» – критическая величина удельной загрязненности ТОТ, ЮУАЭС – Южно-Украинская АЭС, РАЭС – Ровенская АЭС.

Как видно из рис. 2, позиции 1, 2, существует две основные зоны скопления максимального количества заглушенных ТОТ. Зоны локализации дефектов ТОТ соответствуют участкам трубного пучка с наивысшей концентрацией коррозионно-активных примесей. Так, участок нижних рядов ТОТ между решетками НР1-НР5 соответствует зоне скопления шлама, а толщина отложений на поверхности ТОТ на этом участке имеет максимальные значения. Согласно [3], концентрация коррозионно-активных примесей на поверхности ТОТ возрастает по экспоненте в зависимости от толщины отложений.

При авариях, сопровождающихся потерей теплоотвода вторым контуром (например, потеря основной и аварийной питательной воды, полное обесточивание энергоблока), одним из восстановительных действий, предписанных инструкциями по ликвидации аварий и аварийных ситуаций (ИЛА) на реакторной установке (РУ), является восстановление подпитки парогенераторов, в том числе и после существенного снижения уровня давления в нем. С учетом того, что к моменту восстановления подпитки в ПГ поверхность теплообмена со стороны второго контура может быть частично или полностью оголена, подача холодной воды в ПГ может привести к возникновению существенных термических напряжений на ТОТ ПГ, в связи с чем возникает необходимость анализа влияния залива холодной воды на целостность трубчатки; но до решения данной задачи, в качестве промежуточного шага существенным является вопрос того, на сколько значимым для граничных условий является влияние шлама.

Опорные решетки, через которые проходят ТОТ, сконструированы таким образом, что при разогреве и расхолаживании трубки должны свободно перемещаться в опорных местах, при этом дополнительные усилия и моменты в местах их крепления не должны возникать. Однако, как отмечено выше, скопление шлама по длине ТОТ и в опорных точках может приводить к изменению условий опирания ТОТ (граничных (ГУ) и кинематических условий (КУ)).

С целью оценки степени влияния шлама на ГУ и КУ ТОТ и, соответственно, на их НДС выполнен ряд итерационных расчетов.

На основании анализа проектной и конструкторской документации создана геометрическая модель 7 линий ТОТ с фрагментами цилиндрических частей «холодного» и «горячего» коллекторов. Расчетная модель создана с использованием метода конечных элементов (КЭ) [12], реализованного с помощью программного комплекса ANSYS [8].

При моделировании линий ТОТ использованы 4-х узловые оболочечные элементы типа SHELL181 (рис. 5).

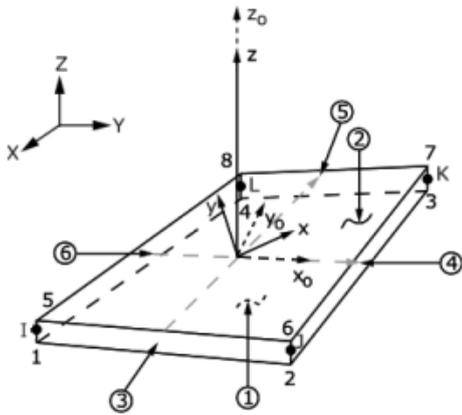


Рис. 5

Выбор данных трубок обусловлен следующими факторами: геометрическая форма TOT (выбранные линии охватывают все разновидности форм TOT по трассировке); TOT, с максимально большими расстояниями между опорными элементами.

Исходные данные для расчета следующие: диаметр TOT – $D_{TOT} = 16$ мм; толщина стенки TOT – $h_{TOT} = 1,50$ мм; материал TOT – сталь 8X18H10T, модуль упругости – $E = 202$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; плотность материала $\rho = 8,1$ т/м³.

Нагрузки приняты с учетом данных [9] в таком виде:

внутреннее давление при НУЭ принято как разница между давлениями 1-го и 2-го контуров:

$$P_{вн} = (17,64 - 7,84) = 9,8 \text{ МПа},$$

нагрузка на TOT от массы находящейся в нем среды учтена через приведенную удельную плотность TOT, которая включает в себя вес TOT+вес среды: вес 1 м.п. TOT = 0,558 кг; вес среды, содержащейся в 1 м.п. TOT:

$$M = V_{д.п.} * \rho_{д.п.} = (\pi r^2 * l_m) * 1000 \text{ кг/м}^2 = 3,14 * (0,0065)^2 * 1000 = 0,133 \text{ кг}.$$

Приведенная удельная плотность TOT с теплоносителем:

$$\rho_{приведенная} = \frac{0,558 \text{ кг} + 0,133 \text{ кг}}{S_{сечение трубы} * l_m} = \frac{0,691 \text{ кг}}{0,0002 \text{ м}^3} = 3455 \text{ кг/м}^3.$$

Приведенная удельная плотность TOT с максимальным отложением шлама:

$$\rho_{приведенная} = \frac{0,558 \text{ кг} + 0,133 \text{ кг} + 0,102 \text{ кг}}{S_{сечение трубы} * l_m} = \frac{0,793 \text{ кг}}{0,0002 \text{ м}^3} = 3965 \text{ кг/м}^3.$$

§2. Результаты расчета по первому этапу (выбор оптимального размера КЭ).

Для определения оптимального размера КЭ для последующих расчетов проанализировано четыре вида конечно-элементной сетки с КЭ типа SHELL181. Данные по проанализированным КЭ сеткам приведены в табл. 1.

Таблица 1

N	Узлов	Элементов
Сетка 1	696658	232610
Сетка 2	436691	132600
Сетка 3	212775	83492
Сетка 4	82160	44609

На первом этапе выполнено определение оптимального размера конечных элементов (КЭ) для последующих расчетов, выполнен анализ сходимости результатов. Выбор оптимального размера КЭ определен для расчетных нагрузок при режиме нормальных условий эксплуатации (НУЭ).

На втором этапе проанализировано поведение одной TOT в режиме НУЭ без учета и с учетом влияния шлама (шлам моделируется в одной зоне, в двух зонах).

На третьем этапе выполнен анализ НДС для набора TOT (для второго этапа выбраны 3 линии TOT внешнего U-образного пучка и 4 линии TOT внутреннего U-образного пучка).

Расчетные напряжения проанализированы в характерных сечениях «1 – 0» – «1 – 5» (см. рис. 6) и представлены на графике на рис. 7, где продемонстрирована сходимость результатов расчета для различных сеток. Анализ представленных на графике значений напряжений показывает, что лучшую сходимость численных результатов имеют сетки 1, 2 и 3. Для дальнейших расчетов выбрана сетка 2.

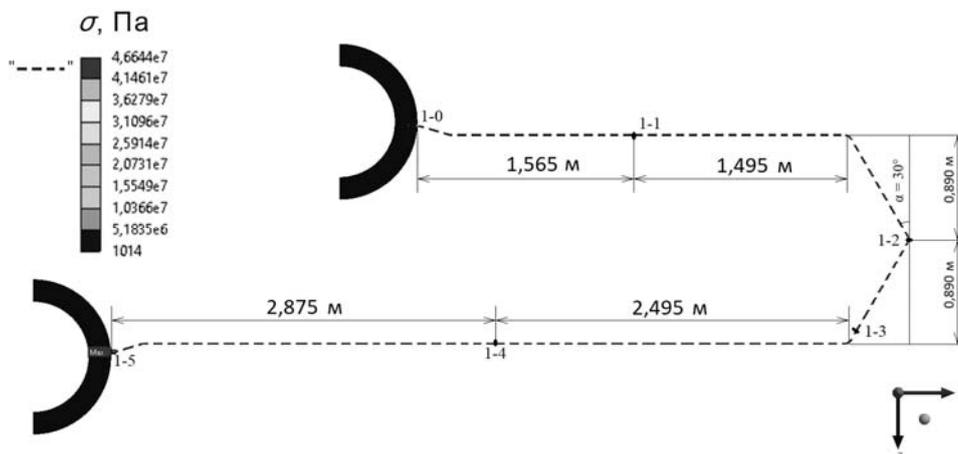


Рис. 6

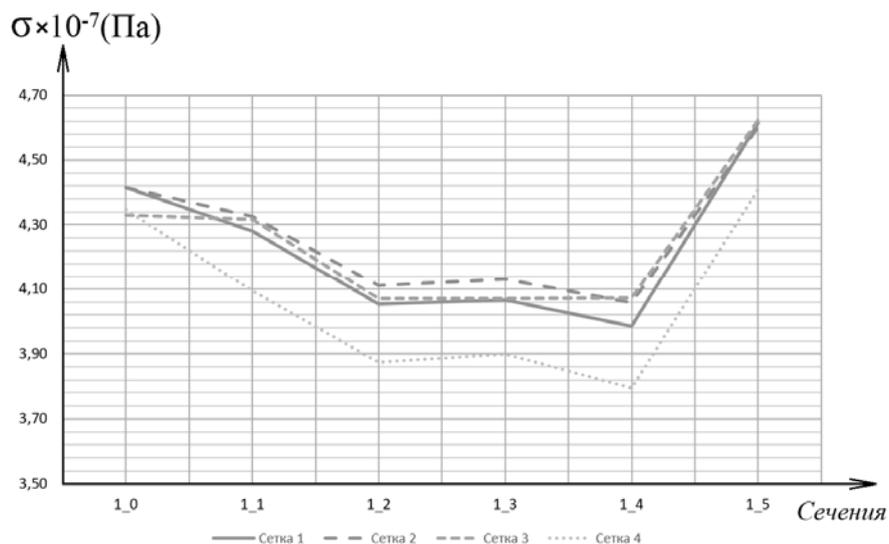


Рис. 7

§3. Результаты расчета по второму этапу (определение НДС для одной ТОТ).

Расчет проведен для НУЭ (значения давления и температуры указаны выше).

Основные этапы оценки НДС трубы и определение значений напряжений в характерных сечениях при НУЭ:

Расчет 1. Начальный период эксплуатации ПГ, шлам на ТОТ отсутствует.

Расчет 2. Появление шлама в зоне перегиба трубы (зона треугольника на рис. 2). Шлам ограничивает перемещение трубы (возможность перемещения ТОТ снижена на 25 %, 50 %, 75 % и 100%).

Расчет 3. Появление шлама в зоне перегиба ТОТ и зоне прямого участка (зона треугольника – 1 и квадрата – 2 на рис. 2). Шлам ограничивает перемещение ТОТ (возможность перемещения ТОТ снижена на 25 %, 50 %, 75 % и 100%) на двух участках.

Напряжения в характерных (исследуемых) сечениях ТОТ представлены на рис. 6.

Моделирование скопления шлама реализовано с помощью упругих опор с расчётными характеристиками жесткостей K_x K_y K_z с целью приблизить моделируемые условия к возможным реальным (см. рис. 8, где показано моделирование граничных условий в условиях скопления шлама: 1 – закрепление на перегибе ТОТ, 2 – закрепление на прямом участке ТОТ).

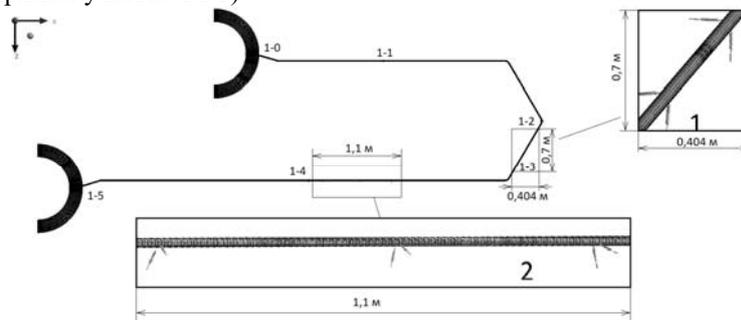


Рис. 8

При этом ограничение перемещения ТОТ по каждой из осей варьировалось значением жёсткости (от минимальной – перемещение возможно, до максимальной – жесткое защемление).

Результаты расчета напряжений в исследуемых сечениях для расчетных случаев (расчет 1 – расчет 3) приведены в табл. 2 и на графике рис. 9, где приведена зависимость напряжений в сечениях 1 – 4, 1 – 5 от изменения кинематических условий.

Таблица 2

%	1 – 0 (Па)	1 – 1 (Па)	1 – 2 (Па)	1 – 3 (Па)	1 – 4 (Па)	1 – 5 (Па)
Расчет 1						
–	4,24E+07	4,12E+07	4,30E+07	4,36E+07	4,14E+07	4,26E+07
Расчет 2						
25 %	4,35E+07	4,10E+07	3,84E+07	0,00E+00	4,93E+07	6,74E+07
50 %	4,35E+07	4,10E+07	3,84E+07	0,00E+00	4,93E+07	6,74E+07
75 %	4,35E+07	4,10E+07	3,84E+07	0,00E+00	4,93E+07	6,74E+07
100 %	4,35E+07	4,10E+07	3,84E+07	0,00E+00	4,93E+07	6,74E+07
Расчет 3						
25 %	4,35E+07	4,10E+07	3,84E+07	0,00E+00	6,90E+07	5,26E+07
50 %	4,35E+07	4,10E+07	3,84E+07	0,00E+00	6,91E+07	5,26E+07
75 %	4,35E+07	4,10E+07	3,84E+07	0,00E+00	6,91E+07	5,26E+07
100 %	4,35E+07	4,10E+07	3,84E+07	0,00E+00	6,91E+07	5,26E+07

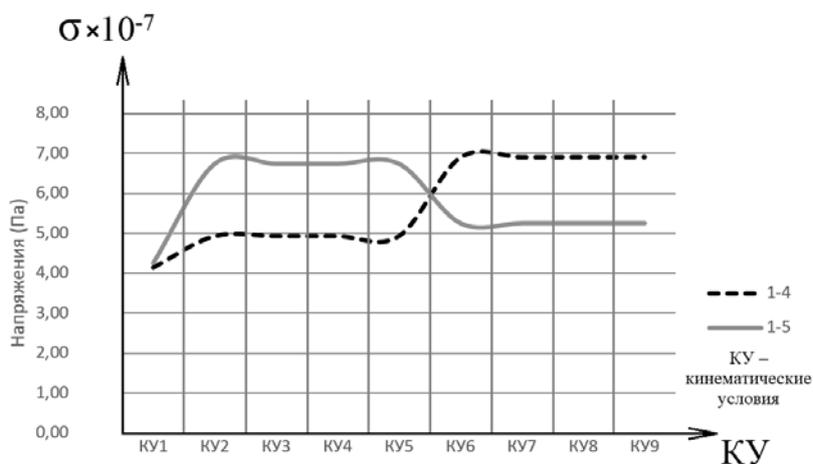


Рис. 9

Как видно из табл. 2 наиболее существенное изменение напряжений характерно для сечений 1 – 4 и 1 – 5. Это объясняется тем, что теплообменная длина ТОТ варьируется от 13 до 15 метров в зависимости от трассировки, и дополнительные жесткие закрепления в одной полупетле практически не влияют на НДС в другой полупетле.

§4. Результаты расчета по второму этапу (определение НДС для нескольких ТОТ).

Ниже на рис. 10 представлены результаты расчеты НДС нескольких ТОТ, которые просчитаны по схеме расчет 1 – расчет 3, аналогичной расчету первого этапа.

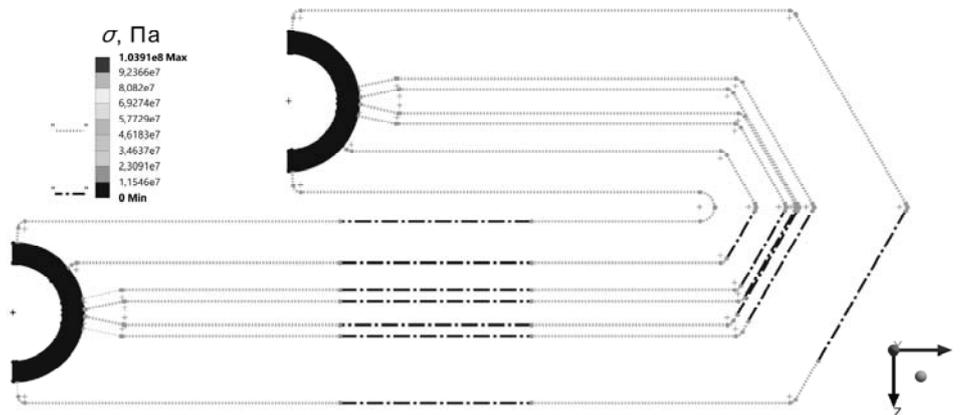


Рис. 10

Анализ результатов расчетов свидетельствует о том, что характер изменения напряжений в исследуемых сечениях сохраняется. Непосредственно значения напряжений отличаются в зависимости от геометрии линии, однако общая тенденция сохраняется.

Заключение.

Результаты выполненного анализа условий эксплуатации ПГ и итерационного расчета, свидетельствуют о следующем:

- 1) одной из основных причин повреждений ТОТ является загрязненность теплопередающей поверхности шламом;
- 2) процесс образования и накопления шлама при эксплуатации ПГ происходит постепенно: чем больше количество шлама, тем существеннее его влияние;
- 3) накопление/налипание шлама на теплообменных трубках изменяет условия их опирания и, соответственно, заложенная в проекте возможность их перемещения существенно снижается, приводя тем самым к непроектному закреплению и образованию локальных зон с высоким уровнем напряжений (результаты исследований представлены выше).

РЕЗЮМЕ. В процесі експлуатації парогенератора (ПГ), через особливості водно-хімічного і температурного режимів виникає забруднення теплообмінних труб (ТОТ) та поверхні ПГ шламом. Скупчення шламу може впливати на поведінку ТОТ у вигляді утворення на її поверхні додаткової маси, обмежувати можливість вільного переміщення в місцях кріплення ТОТ. З метою достовірної оцінки напружено-деформованого стану ТОТ у місцях скупчення шламу, впливу його на формування граничних ТОТ, в умовах максимально наближених до реальної ситуації, виконано окреме дослідження впливу шламу на вказані фактори.

1. Быков Е.М., Колесов А.Ф., Жуков Р.Ю. Результаты испытаний ТОТ ПГВ-1000 с искусственными дефектами // Сборник трудов 6-го Международного семинара по горизонтальным парогенераторам. 22 – 24 марта 2004 г. – Россия, Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2004. – С. 15 – 21.
2. Головки К.Г., Луговой П.З., Мейш В.Ф. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках – К: Издательско-полиграфический центр «Киевский университет», 2012. – 541 с.

3. Карзов Г.П., Суворов С.А., Федорова В.А., и др. Основные механизмы повреждения теплообменных труб на различных этапах эксплуатации парогенераторов типа ПГВ-1000 // Сборник трудов 7-го международного семинара по горизонтальным парогенераторам. 3 – 5 октября 2006. – Россия, Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2006. – С. 31 – 36.
4. Кирияченко В.А., Черкашин А.С., Черкашина Н.И., Радчук И.В. Анализ статистики выхода из строя теплообменных труб парогенератора / Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. – 2011. – № 4 (40) – С. 29 – 33.
5. Луговой П.З., Мейш В.Ф., Штанцель Э.А. Нестационарная динамика неоднородных оболочечных конструкций. – К.: Изд. Полигр. центр «Киевский ун-т», 2005. – 536 с.
6. Парогенератор ПГВ-1000М с опорами. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1. 320.05.00.00.000 ТО. – М.: ОКБ «Гидропресс», 2000. – 255 с.
7. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 524 с.
8. Расчетный комплекс «ANSYS 16», разрешенный к использованию в ГП «НАЭК «Энергоатом» 8 (введено в дію розпорядженням ДП «НАЕК «Енергоатом» від 05.02.2018 р. № 137)».
9. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, P31 матеріали, конструкції, моделі / О.В. Єфімов, М.М. Пилипенко, Т.В. Потаніна та ін. / за ред. О.В. Єфімова. – Харків : ТОВ «В справі», 2017. – 420 с.
10. Abrosov Yu.Yu., Maximyuk V.A., Chernyshenko I.S. Influence of Cross-Sectional Ellipticity on the Deformation of a Long Cylindrical Shell // Int. Appl. Mech. – 2016. – 52, N 5. – P. 529 – 534.
11. Bespalova E.I., Yaremchenko N.P. Stability of Systems Composed of Shells of Revolution // Int. Appl. Mech. – 2017. – 53, N 5. – P. 545 – 555.
12. Carrera E. Theories and Finite Elements for Multilayered, Anisotropic, Composite Plates and Shells // J. of Archives of Computational Methods in Engineering. – 2002. – 9, N 2. –P. 87 – 140.
13. Grigorenko Ya.M., Grigorenko A.Ya., Vlaiikov G.G. Problems of mechanics for anisotropic inhomogeneous shells on the basis of different models. – Kiev: S.P. Timoshenko Institute of Mechanics, Technical center of the National Academy of Science of Ukraine, 2009. – 550 p.
14. Grigorenko A.Ya., Yaremchenko S.N. Analysis of the Stress–Strain State of Inhomogeneous Hollow Cylinders // Int. Appl. Mech. – 2016. – 52, N 4. –P. 342 – 349.
15. Grigorenko Ya.M., Rozhok L.S. Stress State of Longitudinally Corrugated Hollow Cylinders with Different Cross-Sectional Curvature // Int. Appl. Mech. – 2016. – 52, N 6. – P. 581 – 586.
16. Timoshenko S.P., Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells, 2.edition. – London: McGraw-Hill, 1970. – P. 591.

Поступила 02.04.2018

Утверждена в печать 22.11.2018