

Рассмотрено температурное поле графитовой кладки, при различных концентрациях компонентов продувочной смеси.

Установлена линейная зависимость увеличения средней температуры графитовой кладки, при увеличении концентрации азота в продувочной смеси.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Батурин О.В., Батурин Н.В., Матвеев В.Н. Расчет течений жидкости и газа с помощью универсального программного комплекса Fluent - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. - 151с.: ил.
2. Афанасьев В.Н., Недайвозов А.В. Методические указания к выполнению учебных заданий по курсу “Термодинамика”: Электронное учебное издание. - М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 26 с.

Научный руководитель: А.В. Воробьев, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ЭВОЛЮЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС

Г.А. Китаев

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5022

Парогенераторы (ПГ) АЭС с ВВЭР, это теплообменные аппараты, передающие тепло от первого контура во второй контур и вырабатывающие пар, который приводит в действие турбогенераторы АЭС.

Конструктивно парогенераторы представляют корпусные сосуды с несколькими тысячами труб. Теплоноситель первого контура проходит внутри теплообменных труб и нагревает воду до образования пара.

ПГ является барьером между первым радиоактивным контуром и водо-паровой средой, имеющей контакт с окружающим пространством, в связи с чем этот барьер должен быть надёжным.

Для того чтобы тонкостенные теплообменные трубы (ТОТ) парогенератора исполняли функции этого эффективного барьера, они не должны иметь больших или сквозных дефектов.

Выбор материала ТОТ, соответствующего требованиям надежности и экономичности, – один из основных критериев для обеспечения их надежной работы.

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Развитие ПГ для российских и зарубежных реакторов происходит принципиально разными путями. В проектах наших конкурентов применяются вертикальные ПГ, где используются горизонтальные трубные доски и вертикальные U-образные трубки.

На первых порах и в СССР, и в США использовались похожие материалы для производства ПГ - нержавеющие стали. Однако, столкнувшись с трудностями при применении нержавеющей стали SS304, американские специалисты приняли решение о переходе на сплав 600МА. Они считали, что высоконикелевый сплав окажется коррозионностойким. Однако, начиная с 1980 года, на АЭС Соединённых Штатов и других стран, построенных по американским проектам, пошла череда замен ПГ.[3]

За рубежом был проведен огромный объем НИОКР, который на несколько порядков превышает сделанное в России. Так на данный момент для изготовления труб парогенераторов конкуренты применяют легированные стальные сплавы 690ТТ, 800, 800Н и 800НТ.

Однако количество глушений трубок на зарубежных АЭС остается на порядок выше, что отчасти вызвано жесткими условиями работы в вертикальных ПГ.

ВЛИЯНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Важнейшим фактором, влияющим на работоспособность трубчатки, является водно-химический режим.

За более чем 20 летний срок эксплуатации нормируемое содержание хлоридов в продувочной воде парогенераторов снизилось с 500 до 100 мкг/кг, натрия - с 1000 до 300 мкг/кг, а показатель рН повысился с 7,8-8,8 до 8,5-9,2. Содержание сульфатов в продувочной воде также нормируется с 1997 г.

Наличие во втором контуре медьсодержащих материалов (конденсаторы турбин, подогреватели низкого давления, бойлеры) не позволяет также повысить рН питательной воды выше 9,2 для минимизации выноса продуктов коррозии железа из конденсатно-питательного тракта. На большинстве АЭС с PWR величина рН питательной воды составляет 9,4-9,8, фактическое содержание железа – менее 5 мкг/кг.

На зарубежных АЭС с PWR трубные системы конденсаторов выполнены из титановых сплавов и протечки фактически отсутствуют, т.е. не превышают 0,05 л/ч. Это позволяет нормировать и поддер-

живать величину содержания хлоридов, сульфатов и натрия в продувочной воде не более 20 мкг/кг. [2]

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ

Характерной особенностью парогенераторов АЭС с ВВЭР является – горизонтальный цилиндрический корпус, горизонтальные змеевики ТОТ, заделанных в вертикальные коллекторы теплоносителя, а также использование верхней части объема корпуса для гравитационной сепарации.

Особенностью также является применение, в качестве теплообменной поверхности, труб размером 16x1,5 мм (16x1,4 мм для ПГВ-1000МКП с 1990г.) из нержавеющей стали аустенитного класса -08X18H10T.

Одним из кардинальных путей увеличения ресурса парогенераторов является применение для теплообменных труб материалов, обладающих значительно большей стойкостью против хлоридного коррозионного растрескивания в эксплуатационных условиях по сравнению с применяемой в настоящее время сталью.

Принятая в качестве перспективного материала сталь 03X21H32M3B-ВИ (ЧС-33, ЭП 864) в связи с повышенным содержанием никеля ($\geq 32\%$) обладает существенно большим иммунитетом против коррозионного растрескивания. Низкая концентрация углерода позволяет обеспечить стали стойкость против МКК при содержании ниобия 0,9-1,2% в широком диапазоне температур провоцирующего нагрева, а легирование молибденом – повышенную стойкость против питтинговой коррозии в условиях подшламовой коррозии.

Зарубежными аналогами стали ЧС-33 являются стали типа 1.4558 марок DMV 800 (L, H) и 2.4858 марки DMV 825.

Проведенные в центральном научно-исследовательском институте конструкционных материалов (ЦНИИКМ) «Прометей» испытания в кипящем 42%-ном растворе $MgCl_2$ при температуре 154°C показывают возможность значительного повышения стойкости против коррозионного растрескивания теплообменных труб парогенераторов в случае использования для их изготовления стали ЧС-33. Разрушение образцов из этой стали проходило при значительно больших нагрузках по сравнению со сталью 08X18H10T и в течение более длительного периода нагружения в указанных условиях, а при напряжениях до 350 МПа образцы большей частью не разрушались.

В ЦНИИТМАШе также экспериментально подтверждена большая стойкость ЧС-33 против задержанного деформационного коррозионного растрескивания и хлоридного коррозионного растрескивания по сравнению со сталью 08X18H10T.[4]

На данный момент ЧС-33 рассматривается как возможный материал ТОТ для перспективного ПГВ-1600. Преимущества данного материала дают возможность практически полностью избежать глушения ТОТ, уменьшить их толщину до 1,2 мм и, как следствие, увеличить коэффициент теплопередачи.[1]

Так как ПГВ-1600 на настоящее время находится в разработке, то некоторые необходимые для расчёта характеристики неизвестны, однако, используя методику, представленную в [3], можно рассчитать изменение коэффициента теплопередачи находящегося в эксплуатации ПГВ-1000 при применении в качестве материала ТОТ стали ЧС-33.

С достаточной степенью точности (погрешность расчета менее 4%) коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + R_{cm} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} \quad (1)$$

где $R_{cm} = \frac{\delta_{cm}}{\lambda_m}$ - термическое сопротивление стенки трубы ($m^2 \cdot K / kVt$);

α_1 - коэффициент теплоотдачи со стороны теплоносителя, рассчитывается по эмпирическим зависимостям для случая течения однофазной среды в трубах ($kVt / m^2 \cdot K$);

α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к рабочему телу ($m^2 \cdot K / kVt$).

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Табл. 1. Коэффициент теплопередачи

Материал ТОТ	Коэффициент теплопередачи, К ($kVt / m^2 \cdot K$)
08X18H10T ($\delta_{cm}=1,5$ мм)	6,2
ЧС-33 ($\delta_{cm}=1,2$ мм)	7,05

Коэффициент теплопередачи связан с площадью теплопередающей поверхностью и тепловой мощностью уравнением теплопередачи:

$$Q = KS\Delta t_{cp} \quad (2)$$

где S – площадь теплопередающей поверхности (m^2);

Δt_{cp} – температурный напор ($^{\circ}C$);

K – коэффициент теплопередачи;

Q – тепловая мощность (kVt).

Используя уравнение теплопередачи, можно сделать вывод, что замена материала ТОТ на сталь ЧС-33 дает возможность увеличить тепловую мощность ПГ или при той же мощности уменьшить количество ТОТ на 11%, что приведет к снижению веса ПГ.

Однако, в связи с высокой стоимостью, сталь ЧС-33 пока не находит широкого промышленного применения. В то же время, из ее аналогов за рубежом изготавливают оборудование, работающее с водой высоких параметров, а также различного рода подогреватели, теплообменники, конденсаторы пара.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ПГ вливается полторы тысячи тонн воды в час, а выливается в двести раз меньше. Всё остальное выходит в виде пара. В этих условиях ПГ превращается в настоящую коррозионную машину, где все загрязнения упариваются и концентрируются. При этом возникает отдельная проблема их вывода. Поэтому серьезной проблемой при выборе материала ТОТ является его коррозионная устойчивость при достаточной экономичности.[3]

Для изучения процессов, идущих в ПГ, применяют целый набор научных дисциплин. Это тепломассообмен, гидродинамика, механические дисциплины, сопломат, металловедение, химия (включая электрохимию), математическая статистика и многие другие. Основой для их расчётов являются материалы, правильный выбор которых является необходимым для обеспечения надежной экономичной работы парогенератора и, как следствие, АЭС в целом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Трунов Н.Б., Лукасевич Б.И., Сотсков В.В., Харченко С.А. прошлое и будущее горизонтальных парогенераторов // <http://gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar7/documents/f55>
2. Давиденко С.Е., Трунов Н.Б. Работоспособность теплообменных труб и управление ресурсом парогенераторов АЭС с ВВЭР // <http://gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar7/documents/f46.pdf>
3. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций: Учебник для вузов. Энергоатомздат, 1987.
4. Зубченко А.С., Харина И.Л. Коррозионное растрескивание аустенитных хромоникелевых сталей // Вопросы атомной науки и техники, Научно-технический сборник, Выпуск 23 Реакторные установки с ВВЭР // gidropress.podolsk.ru/files/vant/vant23.pdf

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель, каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.