

Список литературы:

1. Сеницын, А.А. Проблемы энергосбережения в системе отопления и кондиционирования объектов индивидуального строительства. А.А. Сеницын, А.П. Ильин, Н.В. Мнушкин. Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в Российской авиационной и ракетно-космической промышленности: материалы международной научной конференции – Казань: КАИ, 2014. – Т. 3. – С. 650-652.
2. Игонин, В.И. Иллюстративность неравновесной динамики моделирования энергетических систем с диссипативными составляющими. Журнал "Современные наукоёмкие технологии". – 2015. – №1 (часть 1). – С. 23-30.
3. Варфоломеев, Ю.М. Отопление и тепловые сети: Учебник/ Варфоломеев Ю.М., Кокорин О.Я./ – М.: ИНФРА-М, 2010. – 480 с.

Проблема выбора материала теплообменных труб парогенераторов АЭС**Кутаев Г.А.**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск
grigoriy19@mail.com*

Важнейшим элементом АЭС с реакторами с водой под давлением (ВВЭР и PWR) являются парогенераторы (ПГ), выдающие пар на турбину для выработки электроэнергии.

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 надёжности и экономичности, – один из основных критериев для обеспечения их надёжной работы.

Зарубежный опыт

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 посчитали, что высоконикелевый сплав окажется коррозионноустойчивым. Однако, начиная с 1980 года, на АЭС Соединённых Штатов и других стран, построенных по американским проектам, пошла череда замен ПГ.[1]

За рубежом был проведен огромный объём 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 трубоков на зарубежных АЭС остается на порядок выше, что отчасти вызвано жесткими условиями работы в вертикальных ПГ.

Водно-химический режим

Как показывает опыт эксплуатации, основным фактором, влияющим на работоспособность трубчатки, является водно-химический режим. Поэтому наблюдаются значительные различия фактического состояния трубки парогенераторов разных энергоблоков, в отдельных

случаях даже в пределах одного энергоблока. Следует отметить, что в проектах АЭС с ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 первого поколения выбор конструкционных материалов оборудования и трубопроводов второго контура (наличие медьсодержащих сплавов), систем очистки и водоподготовки основывался на опыте тепловой энергетики, что, в конечном итоге, негативно отразилось на надёжности работы парогенераторов. По мере накопления опыта эксплуатации на АЭС с ВВЭР, с учетом анализа ведения водно-химического режима на зарубежных

АЭС с PWR, отечественные нормы водно-химического режима пересматривались как в сторону уменьшения содержания коррозионно-активных примесей в питательной и продувочной воде, так и введения ограничений по дополнительным показателям (например, сульфат-ионам).

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 поддерживать величину содержания хлоридов, сульфатов и натрия в продувочной воде не более 20 мкг/кг. [1]

Современные разработки

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-BИ (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 [2], можно рассчитать изменение коэффициента теплопередачи находящегося в эксплуатации ПГВ-1000 при применении в качестве материала ТОТ стали ЧС-33.

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

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

где $R_{ct} = \frac{\delta_{cm}}{\lambda_m}$ - термическое сопротивление стенки трубы ($m^2 \cdot K/kBt$); α_1 - коэффициент

теплоотдачи со стороны теплоносителя, рассчитывается по эмпирическим зависимостям для случая течения однофазной среды в трубах ($kBt/m^2 \cdot K$); α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к рабочему телу ($m^2 \cdot K/kBt$).

Результаты расчёта представлены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициент теплопередачи

Материал ТОТ	Коэффициент теплопередачи, К (кВт/м ² ·К)
08X18H10T ($\delta_{ct}=1,5$ мм)	6,2
ЧС-33 ($\delta_{ct}=1,2$ мм)	7,05

Коэффициент теплопередачи связан с площадью теплопередающей поверхности 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 (кВт).

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. [1]

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

Список литературы:

1. Трунов Н.Б., Лукасевич Б.И., Сотсков В.В., Харченко С.А. прошлое и будущее горизонтальных парогенераторов // gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar7/documents/f55
2. 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 // <http://gidropress.podolsk.ru/files/vant/vant23.pdf>

Эффективность работы теплогенератора

Кузнецов Е.А.

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), Россия, г. Вологда

Email: kaftgv@vstu.esu.ru

Основное назначение любой системы теплоснабжения состоит в обеспечении потребителей необходимым количеством теплоты требуемого качества (т.е. теплоносителем требуемых параметров).

В зависимости от размещения источника теплоты по отношению к потребителям системы теплоснабжения разделяются на централизованные и децентрализованные.

В децентрализованных системах источник теплоты и теплоприемники потребителей либо совмещены в одном агрегате, либо размещены столь близко, что сильно уменьшаются потери, связанные с транспортировкой теплоносителя. То есть децентрализованные системы теплоснабжения не требуют протяженных теплотрасс по сравнению с централизованным отоплением. Следовательно, задача совершенствования систем децентрализованного отопления, остаётся актуальной по сей день.

Целью данной работы является расчетно-экспериментальное определение количества тепловой энергии с наружной поверхности теплогенератора и конвектора на лабораторно-вычислительном комплексе «децентрализованная система теплоснабжения с электродным источником теплоты» (рис.1).

Вычисление значения тепловых энергий на наружных поверхностях теплообмена в теплогенераторе и конвекторе необходимы для определения коэффициентов эффективности по тепловой энергии.

В связи с выходом на рынок множества генераторов теплоты, работающих от электричества, вопрос об оценке их энергоэффективности в настоящий момент является актуальным.