

С. О. Лысцов¹, Н. П. Майстренко¹, А. А. Захарченко², М. А. Хажмурадов²

¹ ОП «Запорожская АЭС» ГП НАЭК «Энергоатом», Энергодар

² ННЦ ХФТИ, Харьков

О ПРОВЕРКЕ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СООТВЕТСТВИЕ ПРОЕКТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Проведен выбор проверяемых параметров при периодических проверках рециркуляционных систем охлаждения на соответствие проектным характеристикам, анализ возможности указанных проверок и состояния реакторной установки в процессе проверки. Выработаны рекомендации по обеспечению возможности проверок рециркуляционных систем охлаждения на достраиваемых блоках атомных электростанций.

Ключевые слова: системы охлаждения, АЭС, реакторная установка, ВВЭР-1000.

Введение

Согласно положению об обеспечении безопасности атомных электростанций (АЭС) важные для безопасности системы и элементы АЭС проходят прямую и полную проверку на работоспособность и соответствие проектным характеристикам при вводе в эксплуатацию, после ремонта и периодически в течение всего срока эксплуатации АЭС (п. 10.4.3, 10.4.4 [1]). В том случае, когда проведение прямой или полной проверки невозможно, следует проводить косвенные и/или частичные проверки, для чего в проекте АЭС должна быть обоснована их достаточность.

Системы вентиляции реакторной установки должны обеспечивать нормальные санитарно-гигиенические и безопасные условия работы персонала АЭС. Для поддержания допустимой концентрации радиоактивных веществ в воздухе периодически обслуживаемых помещений существует технологическая приточно-вытяжная вентиляция. Одним из назначений технологической вентиляции является создание разрежения в герметичных необслуживаемых помещениях для предотвращения проникновения воздуха, загрязненного радионуклидами, в «чистые» помещения [2].

Другой задачей вентиляционных установок является обеспечение допустимого температурного режима во всех технологических помещениях: не более 40 °С в периодически обслуживаемых помещениях и не выше 60 °С в необслуживаемых помещениях. Также вентиляционные системы обеспечивают охлаждение оборудования реакторной установки. Эти задачи решает рециркуляционная вентиляция, которая выполняется по замкнутой схеме с отводом тепла от воздуха в воздухоохладителях технической водой групп «А», «В» и водой от парогенераторных машин [3]. Применение рециркуляционных вентиляционных систем для отвода выделяемого тепла и очистки воздуха в необслуживаемых помещениях позволяет уменьшить объем воздуха, выбрасываемого в атмосферу, и, соответственно, количество радиоактивных выбросов. На АЭС с реактором ВВЭР-1000 рециркуляционным системам охлаждения (далее – системам охлаждения) присвоено классификационное обозначение: гермооболочки (TL01, TL03, TL04, TL05) – ЗН; фундаментной части (UV05, TL10, TL13) – ЗНО и ЗО.

Опыт эксплуатации АЭС показал, что существующие критерии успешного проведения проверки систем охлаждения не гарантируют выявление целого ряда дефектов, что может привести к превышению предельно допустимой температуры в охлаждаемых помещениях. Целью настоящей работы является обоснование изменений процедур проверки рециркуляционных систем охлаждения на соответствие проектным характеристикам, которые обеспечат получение достоверной информации о состоянии указанных систем и состоянии реакторной установки в процессе проверки.

© С. О. Лысцов, Н. П. Майстренко, А. А. Захарченко, М. А. Хажмурадов, 2011

Выбор параметров, подлежащих контролю

В проекте АЭС указаны следующие технические характеристики систем охлаждения:

- объемный расход воздуха;
- полное давление вентилятора;
- холодопроизводительность;
- перепад давления воздуха на воздухоохладителях;
- температура воздуха на входе и выходе системы охлаждения.

В проекте также указаны следующие технические характеристики смежных систем:

- расчетные тепlopоступления от технологического оборудования и трубопроводов;
- предельно допустимая температура воздуха в помещении;
- предельно допустимая температура технической воды группы «А»;
- температура рабочей воды от пароводяных эжекторных холодильных машин (ПЭМ);
- расходы технической воды группы «А» и рабочей воды от ПЭМ на воздухоохладители.

Рассмотрим указанные выше технические характеристики и определим необходимость и возможность периодической проверки систем охлаждения на соответствие им. При этом для каждого проверяемого параметра должны быть назначены предельно допускаемые отклонения от проектного значения, а для системы охлаждения в целом – критерии успешного проведения проверок.

Объемный расход воздуха. Это основной параметр системы охлаждения, так как отклонения от проектного значения данного параметра в меньшую сторону приводят:

- к снижению коэффициента теплопередачи оребренной поверхности воздухоохладителей, т.е. к повышению температуры воздуха в помещении;
- к нарушению воздухораспределения в обслуживаемых помещениях (отсеках), то есть к локальному повышению температуры воздуха в них.

Полное давление вентилятора. Определять отклонения данного параметра от проектного значения нет смысла: при расчете систем охлаждения подбирается вентилятор со значением полного давления в рабочей точке не менее чем суммарное гидравлическое сопротивление сети. Таким образом, фактическое значение полного давления вентилятора должно быть по определению менее значения данного параметра, указанного в проекте.

Полное давление вентилятора на практике используется при анализе результатов измерений, если имеются отклонения от проектного расхода воздуха системы охлаждения более допускаемого значения.

Холодопроизводительность. Значение данного параметра равно значению тепlopоступлений в помещение от технологического оборудования (количеством тепла, удаляемого общеобменной вентиляцией и передаваемого через стены в смежные помещения, можно пренебречь). Отклонения от проектного значения холодопроизводительности означают:

- в меньшую сторону – пониженные тепlopоступления от технологического оборудования и трубопроводов (отключение оборудования, опорожнение части трубопроводов, меньшую температуру рабочей среды и т.д.);
- в большую сторону – повышенные тепlopоступления от технологического оборудования и трубопроводов (наличие протечек рабочей среды, повышенный коэффициент теплопередачи тепловой изоляции и т.д.).

Из этого следует, что холодопроизводительность системы охлаждения не может служить проверяемым параметром.

Перепад давления воздуха на воздухоохладителях. Это второстепенный параметр системы охлаждения, его увеличение означает наличие крупнодисперсной и волокнистой пыли на оребренной поверхности воздухоохладителей. Как правило, допускается увеличение

данного параметра на 30...50 % по отношению к проектному значению при условии, что отклонение расхода воздуха от проектного значения не превысит допускаемого значения.

Температура воздуха на входе и выходе системы охлаждения. Температура воздуха на входе системы охлаждения (в помещении) – основной параметр, характеризующий работу системы охлаждения и смежных систем.

Значения температуры воздуха на входе и выходе системы охлаждения зависят от значений следующих параметров:

теплопоступления от технологического оборудования и трубопроводов;

температуры технической воды группы «А»;

температуры рабочей воды от ПЭМ;

расхода технической воды группы «А» и рабочей воды от ПЭМ на воздухоохладители.

Поскольку все проектные значения указанных параметров невозможно создать одновременно на действующем блоке АЭС, то выбор температуры воздуха на выходе системы охлаждения в качестве проверяемого параметра также оказывается невозможным.

Таким образом, из проектных параметров критериями успешного проведения проверок систем охлаждения могут быть:

критерий № 1 – температура воздуха на входе системы охлаждения (в помещении) должна быть не более предельно допускаемого значения;

критерий № 2 – отклонения объемного расхода воздуха системы охлаждения от проектного значения в меньшую сторону не более допускаемого значения (в действующей нормативной документации (НД) значения допускаемого отклонения нет);

критерий № 3 – отклонения перепада давления воздуха на воздухоохладителях от проектного значения в большую сторону не более допускаемого значения. При этом если критерий № 3 не выполняется, а критерий № 2 выполняется, то система допускается к дальнейшей эксплуатации.

В то же время указанных выше критериев для успешного проведения проверок явно недостаточно по следующим причинам:

1) перечисленных выше критериев недостаточно для выявления следующих дефектов:

загрязнения трубок воздухоохладителей со стороны воды;

нарушения контакта оребрения с трубками;

прекращения протока воды через часть трубок;

установки заглушек на трубки более допускаемого количества;

протечек воды через перегородки в крышках воздухоохладителей мимо трубок;

недостаточного расхода технической воды группы «А» и рабочей воды от ПЭМ на воздухоохладители.

2) проверки могут быть проведены:

при пониженных значениях теплопоступлений от технологического оборудования и трубопроводов;

в зимний период года при пониженной температуре технической воды группы «А»;

при температуре технической воды группы «А» менее предельно допускаемого значения и пониженной температуре рабочей воды от ПЭМ.

Таким образом, если результаты проверки удовлетворяют только перечисленным выше критериям 1–3, то нет гарантий, что при предельно допускаемой температуре технической воды группы «А», отключении ПЭМ и т.д. в помещении будет обеспечиваться температура воздуха не более предельно допускаемого значения.

Дополнительным критерием успешного проведения проверок должен быть коэффициент теплопередачи воздухоохладителей, подключенных к системе технического водоснабжения группы «А», отклонение которого от паспортного значения в меньшую сторону должно быть не более предельно допускаемого значения.

Зная фактический коэффициент теплопередачи воздухоохладителей, можно определить эффективность работ по очистке внутренней поверхности трубок и оребренной поверхности воздухоохладителей, прогнозировать срок их службы.

Так как для расчета логарифмической разности температур воздуха и воды необходимо измерение температуры воды на входе и выходе воздухоохладителей, при этом определяется значение фактического расхода технической воды группы «А» (при условии отключения рабочей воды от ПЭМ) по методу теплового баланса.

Определять коэффициент теплопередачи воздухоохладителей, подключенных к ПЭМ, нет необходимости по следующим причинам:

классификационное обозначение указанных воздухоохладителей согласно [1] – 4Н; рабочей средой ПЭМ является химобессоленная вода, т.е. отложений на внутренней поверхности трубок практически нет;

указанные воздухоохладители не должны работать в режимах нарушения теплообмена в гермооболочке, обесточении блока и т.д.

Для определения паспортного коэффициента теплопередачи воздухоохладителей необходимо знать их технические характеристики:

площадь оребренной поверхности;

площадь живого сечения по воздуху и воде;

формулу зависимости коэффициента теплопередачи воздухоохладителей от массовой скорости движения воздуха в живом сечении и скорости движения воды в трубках.

Паспортное значение коэффициента теплопередачи воздухоохладителей можно определить по формулам:

для воздухоохладителей ВО-194/2510-61-н-УХЛ4 согласно [4]

$$k = 15 \cdot (\rho v_g)^{0,47} \cdot v_w^{0,14}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (1)$$

где ρv_g – массовая скорость движения воздуха в живом сечении воздухоохладителей, кг/(м²·с); v_w – скорость движения воды в трубках воздухоохладителей, м/с;

для воздухоохладителей ЗСК производства ОП «Атомэнергомаш» согласно [5]

$$k = 12,27 \cdot (\rho v_g)^{0,783} \cdot v_w^{0,152}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad (2)$$

для калориферов КВБ согласно [6]

$$k = 19,77 \cdot (\rho v_g)^{0,32} \cdot v_w^{0,13}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad (3)$$

для калориферов КсК4 согласно [6]

$$k = 15,96 \cdot (\rho v_g)^{0,515} \cdot v_w^{0,17}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (4)$$

Определение возможности проверок и состояние реакторной установки в процессе проверки

Рассмотрим возможность измерения параметров систем охлаждения гермооболочки на АЭС с реактором ВВЭР-1000 проектными средствами измерительной техники (СИТ) на различных этапах проверок (табл. 1): в режиме «Работа на мощности» и на этапе планово-предупредительного ремонта (ППР).

Предремонтные проверки систем охлаждения гермооболочки теоретически можно выполнить при состоянии реакторной установки «Работа на мощности» переносными СИТ, на практике это практически невыполнимо по следующим причинам:

если при проведении проверок не выполнять переключения, необходимо посещение гермооболочки три раза для выполнения измерений на всех вентиляторах, при этом проверки следует начинать за три месяца до вывода блока в ППР;

если при проведении проверок выполнять переключения, для выполнения измерений, осмотра резервных вентиляторов, ввода их в работу, стабилизации параметров систем охлаждения потребуется не менее смены;

в любом случае работа персонала при температуре воздуха в гермооболочке более 40 °С не предусмотрена нормативным документом [7]; даже при температуре воздуха в гермооболочке 40 °С невозможно выполнить требования, содержащиеся в п. 2.11 [7] из-за отсутствия в гермооболочке помещения с оптимальным микроклиматом.

Таблица 1. Измерения параметров систем охлаждения гермооболочки

Параметр	Возможность измерения параметра при проверках			
	предремонтных		послеремонтных	
	Работа на мощности	ППР	ППР	Работа на мощности
Температура воздуха до воздухоохладителей	Есть, кроме системы TL05	Не имеет смысла (нет теплопоступлений)		Есть, кроме системы TL05
Температура воздуха после воздухоохладителей	Есть			Есть
Объемный расход воздуха	Нет	Есть, переносными СИТ		Не требуется
Перепад давления воздуха на воздухоохладителях	Нет			Не требуется
Температура воды до и после воздухоохладителей	Нет	Не имеет смысла (нет теплопоступлений)		Нет

Таким образом, в настоящее время на действующих блоках АЭС с реактором ВВЭР-1000 предремонтные проверки можно выполнить только после вывода блока в ППР. На Запорожской АЭС послеремонтные проверки систем охлаждения гермооболочки выполняются в ППР блока. Не позднее 30 суток после выхода реакторной установки на мощность выполняются эксплуатационные испытания - проектными СИТ измеряются значения температуры воздуха: в центральном зале; в боксах парогенераторов; на выходе вентиляторов систем охлаждения гермооболочки.

При выполнении критериев успешного проведения испытаний оформляется акт.

Рассмотрим возможность измерения параметров систем охлаждения фундаментной части на АЭС с реактором ВВЭР-1000 проектными СИТ на различных этапах проверок (табл. 2).

Таблица 2. Измерение параметров систем охлаждения фундаментной части

Параметр	Возможность измерения параметра при проверках			
	предремонтных		послеремонтных	
	Работа на мощности	ППР	ППР	Работа на мощности
Температура воздуха в помещении	Есть	Не имеет смысла (нет теплопоступлений)		Есть
Температура воздуха после воздухоохладителей	Есть, переносными СИТ			Есть, переносными СИТ
Объемный расход воздуха		Есть, переносными СИТ		Не требуется
Перепад давления воздуха на воздухоохладителях				
Температура воды до и после воздухоохладителей		Не имеет смысла (нет теплопоступлений)		Есть, переносными СИТ

Предремонтные проверки систем охлаждения фундаментной части производятся при режиме реакторной установки «Работа на мощности» с применением переносных СИТ. Следует отметить, что при предремонтных проверках систем охлаждения TL10, UV05 температура воздуха и воды не измеряется по следующим причинам:

указанные системы охлаждения предназначены для охлаждения помещений насосов системы аварийного охлаждения активной зоны реактора (САОЗ) и аварийного питательного насоса (АПН), т.е. аварийных систем, ввести указанное технологическое оборудование в работу специально для проверок систем охлаждения невозможно;

периодическое опробование насосов САОЗ и АПН, во время которого выполняются предремонтные проверки, производится в течение короткого промежутка времени, при этом параметры воздуха и воды не могут стабилизироваться.

Таким образом, в настоящее время на действующих блоках АЭС с реактором ВВЭР-1000 проверка систем охлаждения TL10, UV05 на соответствие проектным характеристикам может быть выполнена только частичная.

Рекомендации для действующих и достраиваемых блоков АЭС

На действующих блоках АЭС с реактором ВВЭР-1000 в настоящее время выполнять проверки систем охлаждения гермооболочки и фундаментной части (TL10, UV05) на соответствие проектным характеристикам в полном объеме невозможно.

На достраиваемых блоках АЭС имеется возможность обеспечить выполнения указанных проверок, для чего предлагается:

1) при выборе воздухоохладителей для систем охлаждения ввести дополнительные условия в расчет:

объемный расход воздуха вентилятора принять 90 % от проектного значения;

коэффициент теплопередачи воздухоохладителей принять 85 % от паспортного значения;

2) включить в проект систем охлаждения гермооболочки дополнительные СИТ для измерения:

температуры воздуха после воздухоохладителей;

температуры воды до и после воздухоохладителей;

объемного расхода воздуха (достаточно измерения статического давления воздуха в воздуховоде, при этом до или после точки врезки не должно быть элементов с изменяющимся гидравлическим сопротивлением);

3) включить в проект систем охлаждения TL10, UV05 дополнительные СИТ для измерения:

температуры воздуха после воздухоохладителей;

температуры воды до и после воздухоохладителей;

объемного расхода воздуха (достаточно вывода импульсных трубок от измерительной диафрагмы в коридор для подключения переносного СИТ);

перепада давления воздуха на воздухоохладителях (достаточно вывода импульсных трубок в коридор для подключения переносного СИТ).

Последние два предложения необходимы для защиты наладочного персонала от высокого уровня шума от работающих насосов при выполнении предремонтных проверок.

Для создания тепловой нагрузки на воздухоохладители систем охлаждения TL10, UV05 при периодических проверках на соответствие проектным характеристикам предлагается установка в помещениях насосов САОЗ и АПН воздушно-отопительных агрегатов или калориферов в составе указанных систем с подачей на них сетевой воды. Если это предложение неприемлемо для проектной или эксплуатирующей организации, то следует обеспечить возможность хранения значений температуры воздуха и воды в памяти управляющей вычислительной системы (УВС) при включении насосов САОЗ и АПН в аварийном режиме, чтобы затем определить коэффициент теплопередачи воздухоохладителей.

Очевидна также необходимость при разработке в Украине нормативного документа, аналогичного [8] или пересмотре руководящего документа [9] внести в него:

- 1) допускаемые значения отклонения от проектного значения объемного расхода воздуха для рециркуляционных систем охлаждения;
- 2) допускаемые значения отклонения от паспортного значения коэффициента теплопередачи воздухоохладителей;
- 3) требования к заводам-изготовителям воздухоохладителей о включении в ТУ (паспорт) дополнительных технических характеристик:
 - площади оребренной поверхности;
 - площади живого сечения по воздуху и воде;
 - формулы (графика, таблицы, номограммы) зависимости коэффициента теплопередачи воздухоохладителя от массового расхода воздуха в живом сечении и скорости движения воды в трубках;
- 4) требование о принятии в расчете воздухоохладителей для систем охлаждения минимально допускаемых значений объемного расхода воздуха вентилятора и коэффициента теплопередачи воздухоохладителей;
- 5) требование о включении в проект технических средств для возможности проверок рециркуляционных систем охлаждения в помещениях аварийных систем на соответствие проектным характеристикам.

Выводы

В статье обоснована необходимость внесения изменений в процедуры проверки рециркуляционных систем охлаждения на соответствие проектным характеристикам. Показано, что на действующих блоках АЭС с реактором ВВЭР-1000 в настоящее время выполнять проверки систем охлаждения гермооболочки и фундаментной части (TL10, UV05) на соответствие проектным характеристикам в полном объеме невозможно.

Для обеспечения возможности указанных проверок на достраиваемых блоках АЭС необходим ввод в нормативные документы дополнительных условий и технических характеристик при выборе воздухоохладителей для систем охлаждения и включение в проект систем охлаждения гермооболочки, TL10, UV05 дополнительных СИТ для измерения температуры воздуха и воды после воздухоохладителей, а также объемного расхода воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Загальні положення безпеки атомних станцій*: НП 306.2.141-2008. – К.: Держатомрегулювання України, 2008. – 25 с.
2. *Лыцов С.О.* Поддержание разрежения в помещениях зоны «строгого» режима АЭС / Лыцов С.О., Майстренко Н.П., Захарченко А.А., Хажмурадов М.А. // *Збірник наукових праць СНУЯЕтаП.* – 2011. – вип. 1(37). – С. 25–33.
3. *Технологические системы реакторного отделения ВВЭР-1000 с РУ В-320. Часть 2. Вспомогательные системы.* / БАЭС: ЦПП, 2000. – 287 с.
4. *Технические характеристики пучка ТЭМЗ-XXVI / Троицкий электромеханический завод. Инструкция по эксплуатации.*
5. *Воздухоохладители.* Технические условия: ТУ У 29.2-26444970-002:2006. – [Действуют с 2006-01-01]. – ОП «Атомэнергомаш».
6. *Торговников Б.М.* Проектирование промышленной вентиляции: Справочник / Б. М. Торговников, В. Е. Табачник, Е. М. Ефанов – К.: Будівельник, 1983 – 256 с.
7. *Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень*: ДСН 3.3.6.042-99 / Міністерство охорони здоров'я – К.: МОЗ, 2000. –15 с.
8. *Правила устройства и эксплуатации систем вентиляции, важных для безопасности, атомных станций*: НП-036-05 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. – М.: 2006. – 8 с.
9. *Правила технологического проектирования атомных станций (с реакторами ВВЭР)*: РД 210.006-90 / Минатомэнергопром СССР. – М.: Минатомэнергопром СССР, 1990.

С. О. Лисцов, М. П. Майстренко, О. О. Захарченко, М. А. Хажмурадов

**ПРО ПЕРЕВІРКУ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ
НА ВІДПОВІДНІСТЬ ПРОЕКТНИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

Проведено вибір параметрів, що перевіряються при періодичних перевірках рециркуляційних систем охолодження на відповідність проектним характеристикам, аналіз можливості зазначених перевірок та стану реакторної установки в процесі перевірки. Вироблено рекомендації щодо забезпечення можливості перевірок рециркуляційних систем охолодження на блоках атомних електростанцій, що добудовуються.

Ключові слова: системи охолодження, АЕС, реакторна установка, ВВЕР-1000.

S. O. Lystzov, N. P. Maystrenko, A. A. Zakharchenko, M. A. Khazhmuradov

**ABOUT CHECKS OF RECIRCULATING COOLING SYSTEMS ON CONFORMITY
TO PROJECT CHARACTERISTICS**

The choice of checked parameters is spent at periodic checks recirculating cooling systems on conformity to project and design characteristics, the analysis of definition of possibility of the specified checks and condition reactor's installation thus. Recommendations about a possibility of checks of the specified systems on completed NPP blocks are developed.

Keywords: cooling systems, NPP, reactor plant, WWER-1000.

Поступила в редакцию 25.04.11