

УДК 621.039

И.И. Свириденко, доц., канд. техн. наук,

С.Н. Ткач, старший преподаватель

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: emss@stel.sebastopol.ua;

Д.Н. Агафонов, аспирант

ОП «Южно-украинская АЭС» НАЭК «Энергоатом»

г. Южноукраинск, Украина, 34400

ОРГАНИЗАЦИЯ ПАССИВНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ГЕРМОПРОХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМЫ ПРОДУВКИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС

Рассматривается схема пассивной тепловой защиты бетонных конструкций гермооболочки реакторного отделения атомной электростанции в местах прохода трубопроводов системы продувки парогенераторов, основанная на использовании испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа – низкотемпературных двухфазных термосифонов. Представлены описание и принцип действия пассивной тепловой защиты гермопроходки, а также схема экспериментальной установки для проведения исследований ее теплоотводящей способности.

Для обеспечения защиты железобетонных конструкций гермооболочки реакторного отделения (РО) атомной электростанции (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) в местах прохода горячих трубопроводов пара, питательной воды и продувки парогенератора от повышенной тепловой нагрузки в настоящее время применяется активная система воздушного охлаждения гермопроходок. Допустимая температура железобетона, обеспечивающая поддержание его заданных прочностных характеристик, согласно проекта, составляет 35 °С. Охлаждения гермопроходок осуществляется с помощью принудительной циркуляции воздуха через кольцевой зазор между теплоизоляцией трубопровода и железобетоном [1].

Целью работы является разработка мероприятий, обеспечивающих существенное повышение надежности и безопасности функционирования защитной оболочки реакторного отделения АЭС в местах пересечения их гермопроходками горячих трубопроводов.

На рисунке 1 изображена схема существующей воздушной системы охлаждения вертикальных гермопроходок трубопроводов продувки парогенераторов ПГВ энергоблоков АЭС с несерийными ВВЭР-1000/В-302 (В-338). Принудительная циркуляция воздуха осуществляется системой вытяжной вентиляции В-64, являющейся системой нормальной эксплуатации, важной для безопасности [2, 3]. В состав системы входят три вентилятора (один находится постоянно в работе, два – в резерве), гермопроходка с разделительной обечайкой, воздухопроводы и запорная арматура. Электропри-

воды вентиляторов подключены к системе электроснабжения собственных нужд энергоблока.

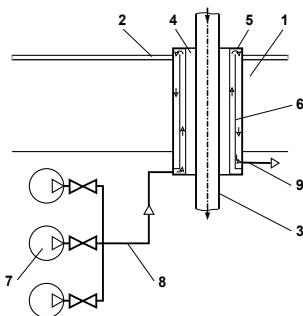


Рисунок 1 – Схема системы активного охлаждения гермопроходки с помощью принудительной циркуляции воздуха, применяемая на АЭС с ВВЭР: 1 – бетонное перекрытие гермооболочки; 2 – гермооблицовка; 3 – трубопровод системы продувки парогенератора; 4 – теплоизоляция; 5 – гермопроходка; 6 – обечайка разделения потоков воздуха; 7 – вентилятор; 8 – трубопровод подачи охлаждающего воздуха; 9 – отвод охлаждающего воздуха

Надежность работы рассмотренной системы воздушного охлаждения обеспечивается трехкратным резервированием вентиляторов. Однако в условиях максимальной запроектной аварии АЭС с полным длительным обесточиванием, либо при локальном нарушении электроснабжения системы В-64 произойдет нарушение условий нормального отвода теплоты от гермопроходки, перегрев ее закладных элементов, что может привести к растрескиванию бетонных конструкций гермооболочки РО и стать причиной нарушения ее герметичности. Нарушение герметичности воздушного тракта проходки со стороны гермооболочки приведет к разгерметизации объема РО и может стать причиной распространения радиоактивных загрязнений за пределы основных барьеров безопасности. Кроме того, рассмотренная активная система воздушного охлаждения является дополнительным потребителем электроэнергии, что увеличивает затраты на собственные нужды и приводит к снижению КПД установки. Электровентиляционное оборудование имеет существенные габариты и сравнительно большую протяженность воздухопроводов. Элементы системы нуждаются в ежегодном техническом и ремонтном обслуживании, а имеющие ограниченный ресурс электровентиляторы требуют периодической замены. Указанные обстоятельства являются причиной повышенных затрат на собственные нужды и ремонтное обслуживание энергетической установки АЭС, что в конечном счете влияет на значение себестоимости производимой электроэнергии.

В связи с этим для повышения надежности и безопасности функционирования защитной оболочки реакторного отделения АЭС, а также с целью снижения затрат на собственные нужды необходимо внедрение пассивных устройств отвода теплоты от гермопроходов горячих трубопрово-

дов, функционирование которых не требует внешней энергии, технического и ремонтного обслуживания, и участия персонала в аварийных ситуациях.

Для решения поставленной задачи предлагается организация пассивной тепловой защиты гермопроходок за счет использования испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа – низкотемпературных двухфазных термосифонов (ДТС). Основным преимуществом ДТС является высокая теплопередающая способность и автономность. Использование фазовых переходов на участках подвода и отвода теплоты, передача теплового потока за счет переноса скрытой теплоты парообразования промежуточного теплоносителя, а также простота конструкции ДТС обеспечивают им высокую эффективность и надежность работы. Организация теплоотвода от гермопроходки с тепловой защитой на основе ДТС не требует использования каких-либо внешних источников энергии. Отсутствие обслуживающих гермопроходку систем дает возможность существенно сократить затраты на собственные.

На рисунке 2 изображена схема предлагаемого устройства пассивной тепловой защиты вертикальных гермопроходок трубопроводов системы продувки парогенератора. Устройство устанавливается непосредственно в проходку трубопровода 1 системы продувки и состоит из следующих элементов: наружной 2 и внутренней 3 обечайки корпуса ДТС, разделительной цилиндрической вставки 4, нижнего 5 и верхнего 6 доннышек, а также внешнего воздушного оребрения 7.

При монтаже оборудования и систем РО во время строительства АЭС конструкция гермопроходки с термосифонным устройством тепловой защиты формируется в два этапа. На первом этапе, который выполняется при монтаже гермооболочки, перед заливкой железобетонного перекрытия 9 наружная обечайка 2 корпуса ДТС с заранее приваренными ребрами 7 и закладными деталями 8 устанавливается на место будущей гермопроходки. Таким образом, обечайка 2 формирует цилиндрический проем в горизонтальном перекрытии 9 ГО. После заливки бетонного перекрытия 9 его верхняя поверхность покрывается металлической герметичной облицовкой 14. Для обеспечения герметизации проходки обечайка 2 приваривается к облицовке 14.

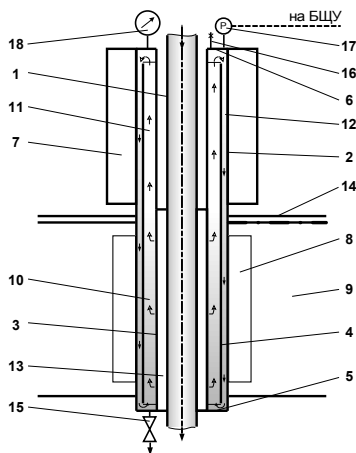


Рисунок 2 – Схема вертикальной гермопроходки с термосифонным устройством пассивного отвода теплоты: 1 – трубопровод продувки парогенератора; 2, 3 – наружная и внутренняя обечайки корпуса ДТС, соответственно; 4 – цилиндрическая вставка; 5, 6 – нижнее и верхнее доньшки, соответственно; 7 – внешнее оребрение; 8 – закладная деталь; 9 – горизонтальное железобетонное перекрытие гермооболочки; 10 – зона испарения; 11 – транспортный участок; 12 – зона конденсации; 13 – вентилятор; 14 – клапан; 15 – датчик температуры; 16 – клапан; 17 – на БЩУ; 18 – датчик температуры.

Второй этап формирования гермопроходки выполняется уже при монтаже трубопроводов системы продувки парогенераторов. Перед установкой трубопровода 1 в проем гермопроходки к нему приваривается нижнее доньшко 5, которое и будет несущим элементом ДТС и всей гермопроходки. К доньшку 3 приваривается внутренняя обечайка 3 корпуса ДТС, после чего вся конструкция приваривается к наружной обечайке 2. В таком виде сформированную внутреннюю полость ДТС очищают и проводят предварительную отмывку. Далее в корпус ДТС устанавливают разделительную цилиндрическую вставку 4 и приваривают верхнее доньшко 6. После этого проводят гидроиспытания ДТС на плотность и прочность.

Для промывки внутренней полости ДТС перед заправкой, а также для дренажа теплоносителя на нижнем доньшке 5 размещается дренажный клапан 15. Для заправки ДТС теплоносителем на верхнем доньшке 6 устанавливается штенгель 16, который после заправки пережимается и обваривается. С целью снижения тепловой нагрузки на бетон, а также для уменьшения тепловых потерь от участка трубопровода 1, проходящего через гермопроходку, устанавливается теплоизоляции 13.

Перед заправкой теплоносителем внутренняя полость ДТС окончательно отмывается, обезжиривается и вакуумируется. Теплоноситель перед заправкой в термосифон дегазируется. Отмывка, обезжиривание и заправка ДТС теплоносителем выполняются согласно методике, представленной в [4].

Термосифонное устройство пассивной тепловой защиты работает сле-

дующим образом. Тепловой поток от горячего трубопровода 1 через теплоизоляцию 13 воспринимается внутренней обечайкой 2 ДТС. Под действием теплового потока жидкий теплоноситель, находящийся в зоне испарения 10 ДТС, испаряется. Пар по транспортному участку 11 поднимается вверх к зоне конденсации 12, где конденсируется за счет охлаждения внешним конвективным воздушным потоком. Конденсат под действием массовых сил по опускному участку возвращается в испаритель 10.

С целью предотвращения взаимодействия встречных потоков пара и конденсата во внутренней полости ДТС установлена разделительная цилиндрическая вставка 4. Для увеличения поверхности теплоотдачи от конденсатора ДТС наружному воздуху применяется внешнее оребрение 7. В процессе эксплуатации осуществляется контроль температуры во внутренней полости ДТС по значению давления насыщения теплоносителя. Данный параметр от датчика давления 17 выносится на блочный щит управления (БЩУ). Кроме того, при вакуумировании перед заправкой ДТС теплоносителем, а также во время испытаний давление во внутренней полости термосифона контролируется по показаниям мановакуумметра 18.

Анализ режимных характеристик системы принудительного воздушного охлаждения вертикальных гермопроходок трубопроводов продувки парогенератора АЭС с ВВЭР-1000/В-302 (В-338), проведенный на Южно-Украинской АЭС, позволил установить, что перепад температуры внутри гермопроходки находится в диапазоне 40...50°C, при средней температуре воздуха 60 °С. Расход воздуха через одну гермопроходку составляет $1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, устройство тепловой защиты гермопроходки должно обеспечивать отвод теплоты величиной не менее чем 4,5 кВт. Площадь охлаждаемой поверхности гермопроходки составляет 2 м², при этом плотность теплового потока не будет превышать 1,75...2,25 кВт/м².

Для экспериментальной проверки эффективности работы пассивного устройства тепловой защиты гермопроходки на кафедре Энергоустановок морских судов и сооружений Севастопольского национального технического университета разработана, изготовлена и проходит этап монтажа экспериментальная установка, схема которой изображена на рисунке 3. Модель гермопроходки формируется из участка трубопровода системы продувки парогенератора, термосифонного устройства тепловой защиты и фрагмента блока бетонного перекрытия гермооболочки РО. Для организации теплоподвода к модели гермопроходки используется воздушный теплоэлектронагреватель (ТЭН) 10, установленный в участок трубы 1, имитирующий трубопровод системы продувки парогенератора. Этот участок изготовлен из реальной трубы размером 89×9 мм, материал – Ст 20, применяемой на АЭС для трубопроводов данной системы.

Термосифонная тепловая защита гермопроходки располагается аксиально трубопроводу 1. Конструкция термосифона изготовлена из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса 08Х18Н10Т и включает вну-

треннюю 2 и наружную 3 обечайки, верхнее 6 и нижнее 9 доньшки, разделительную цилиндрическую вставку 4. Нижнее доньшко приварено к обечайкам, верхнее – выполнено в виде крышки и имеет разъемное фланцевое соединение с обечайками ДТС. Уплотнение крышки осуществляется с помощью никелевой прокладки и затягивается шпильками. На верхней крышке расположены заправочный штенгель с игольчатым клапаном 13, мановакуумметр 15, гильзы со штуцерными соединениями 14 для вывода термopарных зондов 8. На нижнем доньшке установлен штуцер с дренажным клапаном 16. Вокруг обечайки 3 формируется фрагмент бетонного перекрытия 12, изготовленный в виде сборных секторов. Верхняя поверхность бетонных секторов покрывается стальным листом 7, имитирующим внутреннюю облицовку оболочки РО. Трубопровод 1, как и на реальной гермопроходке, изолируется кольцевым слоем теплоизоляции 5.

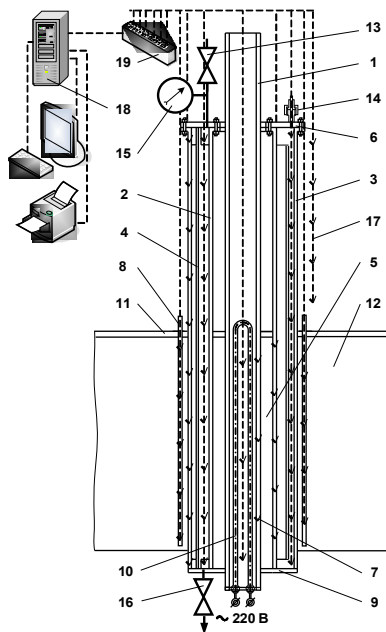


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки: 1 – имитатор трубопровода продувки; 2 – внутренняя обечайка ДТС; 3 – наружная обечайка ДТС; 4 – разделительная вставка; 5 – теплоизоляция гермопроходки; 6 – верхняя съемная крышка ДТС; 7 – термopара контроля температуры стенки трубопровода; 8 – термopарный зонд; 9 – нижняя несущая торцевая крышка термосифона; 10 – ТЭН; 11 – лист гермооблицовки; 12 – фрагмент бетонного перекрытия; 13 – игольчатый клапан заправки теплоносителем; 14 – уплотнение вывода термopар; 15 – мановакуумметр; 16 – дренажный клапан; 17 – струна; 18 – автоматизированная система сбора и управления данными на базе ПК; 19 – АЦП на базе ADAM 5000;
 ✓ – термopары (внешнее оребрение и закладные не показаны)

Для измерения температуры используются медь-константановые термомпары, сваренные из электродов диаметром $0,18 \cdot 10^{-3}$ м. Показания термомпар регистрируются с помощью автоматизированной распределенной системы сбора и управления данными на базе персонального компьютера (ПК) 17 и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ADAM 5000E производства фирмы Advantech. В качестве устройств связи термомпар с ПК используются модули ввода-вывода 18 АЦП, в которых аналоговый сигнал от термомпар преобразуется в цифровой и, далее, через последовательный порт поступает на ПК 18 с последующим выводом на экран монитора.

Тарировка измерительной системы, включая термомпары, производится непосредственно на экспериментальной установке. Для термометрирования зон испарения, транспорта и конденсации используются термомпары, введенные в полость ДТС. Их токоведущие провода размещены на разделительной цилиндрической вставке 4. Температура стенок всех теплопередающих поверхностей определяется термомпарами, зачеканенными в соответствующих стенках. Для контроля температуры наружного воздуха используются термомпары, размещенные на струне 17 в непосредственной близости от внешней теплоотдающей поверхности конденсатора 3 ДТС.

Заданными параметрами при проведении экспериментальных исследований является температура бетона, непосредственно прилегающего к проходке, максимальное значение которой не должно превышать 35°C , а также температура горячего трубопровода системы продувки, составляющая 250°C . Контроль температуры бетона 12 осуществляется термомпарами, размещенными в зондах 7. Зонды изготовлены из тонкостенных медных трубок $\varnothing_{\text{нар}} = (3 \times 0,15) \cdot 10^{-3}$ м и заформованы в бетон. Контроль температуры трубопровода – термомпарами 7, зачеканенными в стенку трубы 1.

Методика проведения исследований заключается в экспериментальной оценке влияния конструктивных и режимных параметров ДТС на эффективность отвода теплоты от трубопровода 1 в районе гермопроходки, ее трансформацию и рассеивание в окружающее воздушное пространство гермооболочки РО. Эффективность тепловой защиты гермопроходки определяется по показаниям термомпар, размещенных в зондах 8, измеряющих температуру бетона у внешней обечайки 3 ДТС. Все эксперименты проводятся при фиксированных значениях температур имитатора горячего трубопровода гермопроходки и окружающего воздуха.

В процессе эксперимента определяются оптимальные конструктивные параметры устройства пассивной тепловой защиты гермопроходки: геометрические характеристики участков испарения и конденсации ДТС, геометрические характеристики разделительной вставки, геометрические характеристики внешнего оребра участка теплоотвода ДТС. Кроме

того, исследуются режимные параметры устройства: тип теплоносителя и уровень его заполнения ДТС, влияние ингибирующих присадок на теплопередающую способность ДТС, влияние степени предварительного вакуумирования ДТС на теплофизические характеристики устройства тепловой защиты.

Таким образом, предложенная схема пассивной тепловой защиты бетонных конструкций гермооболочки реакторного отделения в местах расположения вертикальных гермопроходов трубопроводов системы продувки парогенераторов, основанная на использовании ДТС, по сравнению с применяемой сегодня на АЭС активной системой воздушного охлаждения имеет целый ряд существенных преимуществ. Основные из них: простота конструкции, надежность, безопасность и автономность в работе. Кроме того, предложенная схема исключает необходимость использования резервных каналов охлаждения, что существенно снижает ее стоимость. Рассмотренное устройство тепловой защиты не нуждается в периодическом техническом обслуживании и имеет неограниченный ресурс работы. Представленное описание и принцип действия термосифонной тепловой защиты гермопроходки подтверждают ее преимущества.

Для подтверждения эффективности пассивной тепловой защиты гермопроходки, а также для определения влияния ряда конструктивных и режимных параметров предложенной конструкции ДТС на его теплоотводящую способность необходимо проведение специальных экспериментальных исследований с моделированием натурных эксплуатационных условий, что является задачей дальнейших исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Инструкция по эксплуатации. Локализирующие системы безопасности блоков № 1, 2. ИЭ.1.0001.0029. — Минтопэнерго Украины, ГП НАЭК «Энергоатом», ОП «Южно-Украинская АЭС», Реакторный цех № 1, Южноукраинск, 2004. — 87 с.
2. Инструкция по эксплуатации. Система вентиляции реакторного отделения блока № 1. ИЭ.1.0018.091. — Минтопэнерго Украины, ГП НАЭК «Энергоатом», ОП «Южно-Украинская АЭС», Реакторный цех № 1, Южноукраинск, 2004. — 80 с.
3. Инструкция по эксплуатации. Система вентиляции реакторного отделения блока № 2. ИЭ.1.0018.089. — Минтопэнерго Украины, ГП НАЭК «Энергоатом», ОП «Южно-Украинская АЭС», Реакторный цех № 1, г. Южноукраинск, 2004. — 80 с.
4. Исследования теплообменных аппаратов на основе низкотемпературных тепловых труб: Отчет о НИР (заключит.). ВНТИЦентр; руководитель В.М. Руденко. — ОЦ02604И5В; № ГР 01830056847; Инв. № 02840087193. — М., 1984. — 88 с.

Поступила в редакцию 29.07.2005 г.