

УДК 621.039.534.24

АНАЛИЗ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С РЕАКТОРОМ ТИПА ВВЭР.  
СИСТЕМА ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛОТЫ  
ANALYSIS OF SAFETY SYSTEMS OF NPPS WWER.  
PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM

Дюдяев И. А., Ромашов С. И., Медуница В. А.,  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
г. Севастополь, Россия.  
I. Dyudyaev, S. Romashov, V. Medunitsa,  
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia.

*Аннотация.* На основе анализа основных эксплуатационных аварий, произошедших на АЭС мира, были проанализированы системы безопасности распространённого типа реактора ВВЭР-1000 и предложена новая пассивная система отвода теплоты от бассейна выдержки, повышающая надёжность установки.

*Abstract.* The safety systems of the common type of WWER-1000 reactor have been analyzed on the basis of analysis of the main operational accidents that occurred at nuclear power plants of the world, and a new passive system of heat removal from the decay pool, which improves the reliability of the unit, has been proposed.

*Ключевые слова:* системы безопасности, АЭС, ВВЭР, система пассивного отвода теплоты, бассейн выдержки, тепловыделяющие сборки, термосифон, теплоноситель.

*Key words:* safety systems, NPP, WWER, passive heat removal system, spent fuel pool, fuel assemblies, thermosiphon, coolant.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее опасных запроектных аварий (ЗПА) на АЭС является полное длительное обесточивание станции с потерей аварийных источников электроснабжения. Так, например, внешнее обесточивание площадки станции с потерей всех аварийных источников электроснабжения на АЭС «Фукусима-1» из-за воздействия цунами, вызванного землетрясением 11 марта 2011 г., привело к нарушению отвода остаточных тепловыделений ядерного топлива в активных зонах реакторов, а также отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в приреакторных бассейнах выдержки (БВ). Перегрев, испарение и связанная с этим потеря теплоносителя в активных зонах и воды, охлаждающей ОЯТ в БВ, привели к перегреву и повреждению ядерного топлива, а в активных зонах – к его плавлению. Пароциркониевая реакция, происходящая на поверхности циркониевых оболочек ТВЭЛ при высокой температуре, стала причиной образования и накопления водорода с последующим его воспламенением и взрывом.

На эксплуатируемых сегодня АЭС с ВВЭР-1000, а также в эволюционных проектах РУ с ВВЭР, технические средства для предотвращения повреждения ОЯТ в БВ в условиях полного длительного обесточивания не предусмотрены. Поэтому целью проекта является создание системы пассивного отвода остаточных тепловыделений (СПОТ) ОЯТ в БВ и внедрение ее на действующих энергоблоках АЭС, а также в проектах перспективных РУ.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Энергонезависимая система, основанная на принципе естественной циркуляции теплоносителя в замкнутом двухфазном контуре, предназначенная для отвода остаточных энерговыделений от приреакторного бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива (СПОТ БВ).

Система представляет собой замкнутый двухфазный контур естественной циркуляции, состоящий из испарительного, конденсационного и транспортного участков. При этом испаритель размещен в объеме, от которого требуется отвести теплоту, конденсатор – за пределами ГО (рис. 1). В качестве теплоносителя используется дистиллированная вода. Движение теплоносителя обеспечивается разностью гидростатических давлений в испарительной (6) и конденсационной (10) полупетлях.

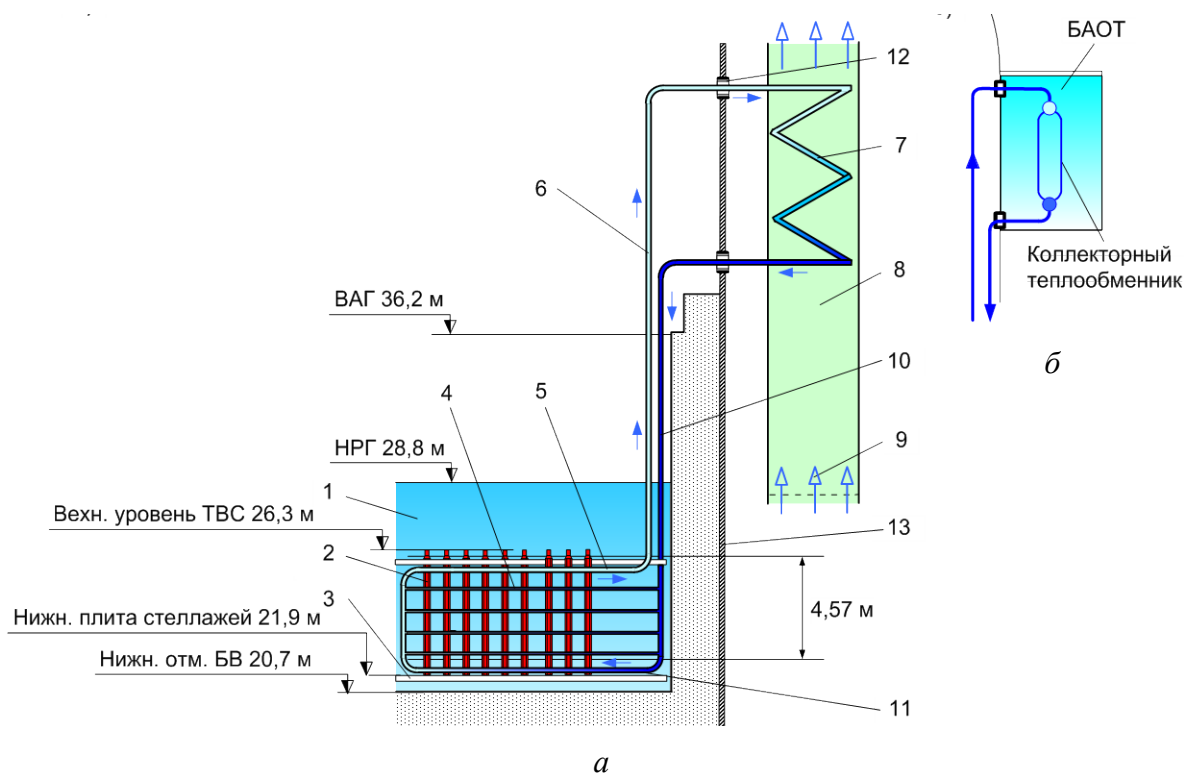


Рис. 1. Схема автономной СПОТ БВ: *а* – на основе кольцевого ДТС; *б* – вариант конденсатора СПОТ с БАОТ; 1 – бассейн выдержки ОЯТ; 2 – тепловыделяющие сборки ОЯТ; 3 – стеллажи; 4 – испаритель кольцевого ДТС; 5 – сборный паровой коллектор; 6 – паровой трубопровод; 7 – конденсатор кольцевого ДТС; 8 – воздушный канал; 9 – поток охлаждающего атмосферного воздуха; 10 – конденсатный трубопровод; 11 – раздающий коллектор; 12 – гермопроходка; 13 – гермооболочка

Наличие замкнутого циркуляционного контура предотвращает возможность байпасирования гермообъема в случае появления неплотности (течи) контура СПОТ либо в пределах ГО, либо за пределами ГО.

Остаточные тепловыделения от ОЯТ отводятся водой бассейна при естественной конвекции. Теплота от воды БВ передается наружной поверхности испарителей двухфазного термосифона (ДТС) 4, а от нее – промежуточному теплоносителю ДТС. За счет внешнего подвода теплоты промежуточный теплоноситель ДТС испаряется, пар через сборный коллектор 5 поступает в паровой трубопровод 6, который через гермопроходки 12 выводится за пределы гермооболочки 13 реакторного отделения и соединяется с конденсатором ДТС 7. Конденсатор 7 охлаждается потоком атмосферного воздуха 9, при этом пар в конденсаторе конденсируется и по конденсатному трубопроводу 10 и раздающему коллектору 11 за счет гравитационных сил возвращается в испаритель 4.

Все элементы испарителя кольцевого ДТС выполнены из пластин и располагаются в зазоре между боковой стенкой БВ и шестигранными чехлами стеллажей. Испарители СПОТ практически не отбирают полезного объема отсеков бассейна, а значит, не снижают количество размещаемых в нем ОТВС.

Теплоотводящая способность СПОТ БВ должна быть подобрана таким образом, чтобы при максимальной загрузке ОЯТ, включая аварийную выгрузку активной зоны после предшествующего останова РУ в момент, близкий к концу кампании, не допустить кипения воды в бассейне (при температуре окружающего воздуха до +40 °С). В этом случае, независимо от продолжительности обесточивания, ОТВС в БВ останутся под уровнем воды, что обеспечит их надежное охлаждение и предотвратит повреждение ТВЭЛ. Практически это означает, что, с учетом неопределенностей расчетов и неравномерности энерговыделений по объему БВ, температура воды в БВ в объеме над стеллажами не должна превысить величину +90 °С.

В качестве промежуточного теплоносителя ДТС может использоваться вода или жидкости с пониженной температурой замерзания. Использование последних позволило бы исключить замерзание промежуточного теплоносителя СПОТ в условиях низких температур окружающего воздуха. В то же время низкокипящие жидкости обладают рядом недостатков, например, пожароопасность или токсичность паров.

Наряду с атмосферным воздухом в качестве конечного поглотителя СПОТ может использоваться вода (рис. 1, б). При этом конечный поглотитель размещается в баке аварийного отвода теплоты (БАОТ). Это снимает вопрос о замерзании промежуточного теплоносителя. В то же время, СПОТ БВ будет эффективно работать лишь до тех пор, пока вода в БАОТ существенно не нагреется (практически – не выше, чем до +70 °С, если исходить из требования, что температура воды в БВ не должна превысить +90 °С). Поэтому вариант с воздушным теплообменником-конденсатором для СПОТ БВ представляется более приемлемым.

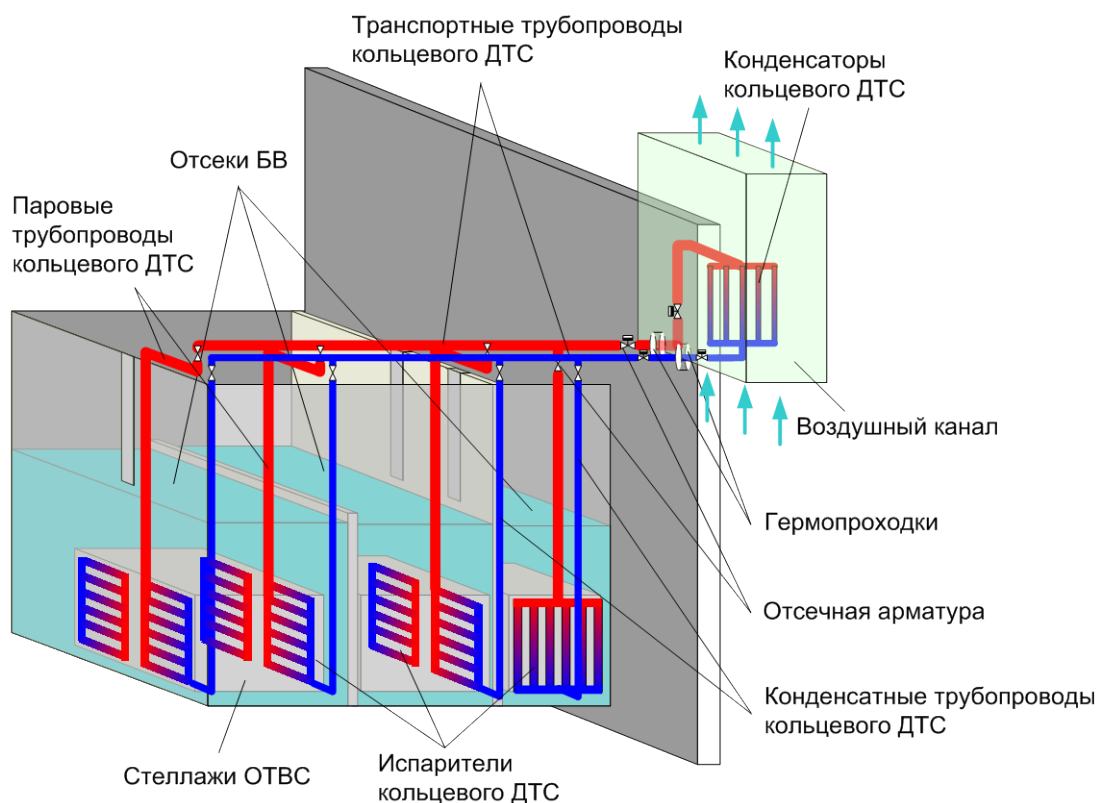


Рис. 2. Расположение автономных секций СПОТ в БВ ОЯТ (показаны не все секции)

Перед заполнением промежуточным теплоносителем кольцевой термосифон вакуумируется для удаления неконденсируемых газов. Давление в циркуляционном контуре СПОТ БВ будет определяться давлением насыщения водяного пара при температуре менее  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и оставаться ниже атмосферного. При возможных течах контура СПОТ БВ исключается выход радионуклидов в атмосферу, а также попадание чистого конденсата в БВ с ОЯТ, что исключает возможность развития реактивных аварий. Система строится по многоканальному принципу, с резервированием основных элементов в пределах канала. При обнаружении течи (например, по факту ухудшения вакуума в контуре ДТС), в условиях нормальной эксплуатации персонал имеет возможность выявить и локализовать (отсечь от общего контура) поврежденную теплообменную секцию. Поскольку теплообменная поверхность выбирается избыточной по отношению к максимально возможной тепловой нагрузке на каждый отсек БВ, система при этом продолжает выполнять функцию теплоотвода в полном объеме.

Возможная схема расположения элементов СПОТ БВ в реакторном отделении АЭС с ВВЭР-1000/В-320 изображена на рис. 3 и 4. Для вывода транспортных трубопроводов через гермооболочку в существующих РУ с ВВЭР 1000/В-320 возможно использовать две из имеющихся шести гермопроходок Ду 1600 мм системы вентиляции реакторного отделения. На плане реакторного отделения место расположения указанных гермопроходок обозначено позицией «В». В новых проектах РУ с ВВЭР для вывода транспортных трубопроводов кольцевого ДТС необходимо предусмотреть дополнительные гермопроходки.

Ввиду недостаточно высокой эффективности трубчатых теплообменников, был рассмотрен вариант применения испарителя, набранного из плоских профилированных пластин.

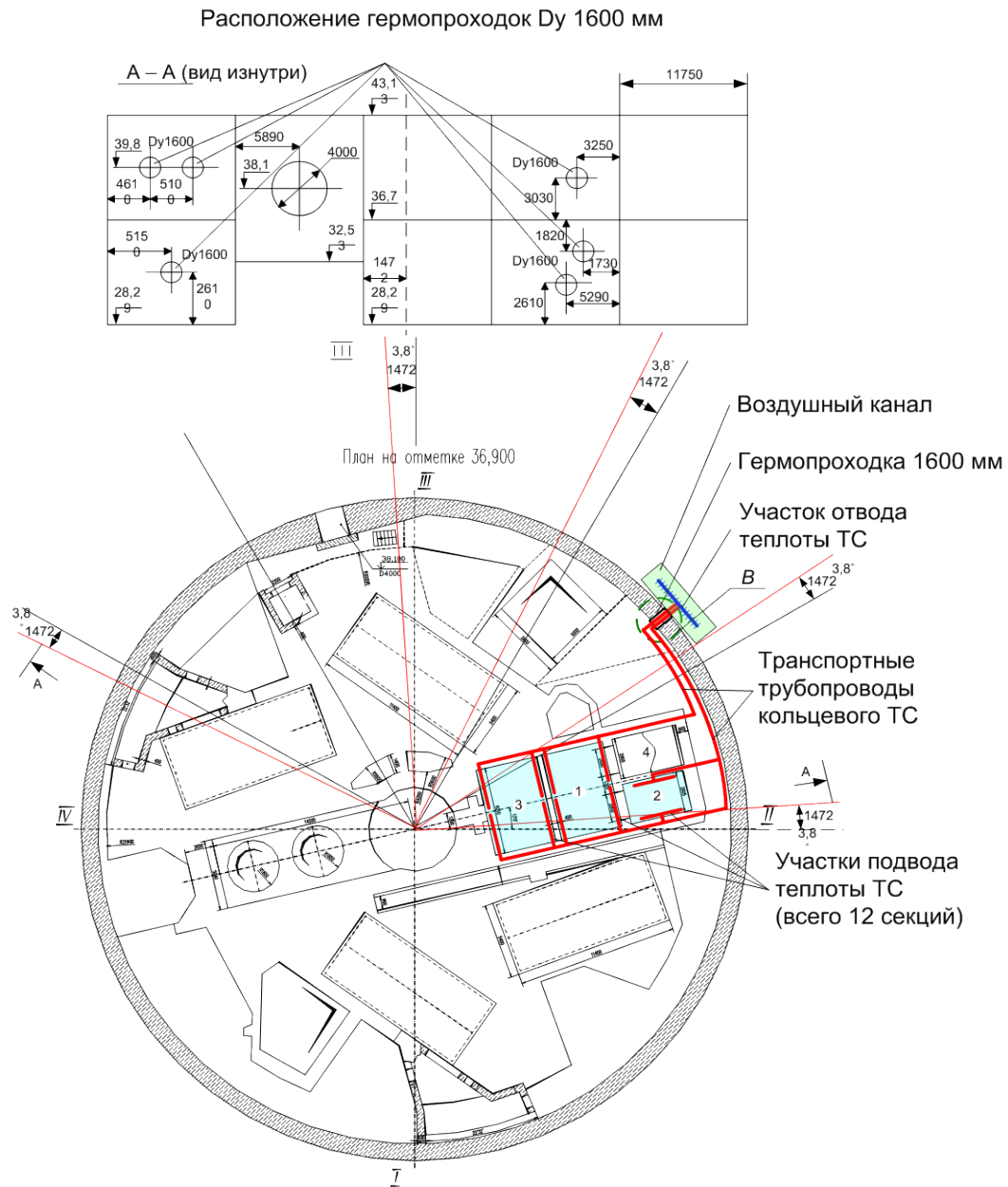


Рис. 3. Расположение элементов СПОТ БВ ОЯТ в реакторном отделении АЭС с ВВЭР-1000/В-320

В качестве материала для изготовления теплообменника, используется пара штампованных пластин размером  $2500 \times 180$  мм и толщиной 1,0 мм, изготовленных из стали 08X18H10T или аналогичной. Пластины соединяются попарно при помощи контактной сварки, в результате по длине внутри полученной сборки образуются 3 параллельных испарительных канала приблизительно прямоугольной формы: два периферийных сечением  $35 \times 4$  мм и центральный сечением  $30 \times 4$  мм. Сверху и снизу пластины соединяются раздаточным и сборным коллекторами. Шаг между пластинами принят равным 10,0 мм. Та-

ким образом, формируется испарительная секция габаритами 2500×2500×200 мм, состоящая из 251 вертикальных параллельных пластин. Теплообменная секция размещается в зазоре между стенкой БВ и стеллажом хранения ОЯТ. Вода БВ перемещается сверху вниз в зазорах между пластинами. При указанных габаритах теплообменной секции, нет необходимости вносить изменения в конструкцию стеллажей хранения ОЯТ.

Еще одним преимуществом пластинчатого теплообменника-испарителя является более слабая чувствительность отводимой мощности к отклонению установившегося заполнения от оптимального.

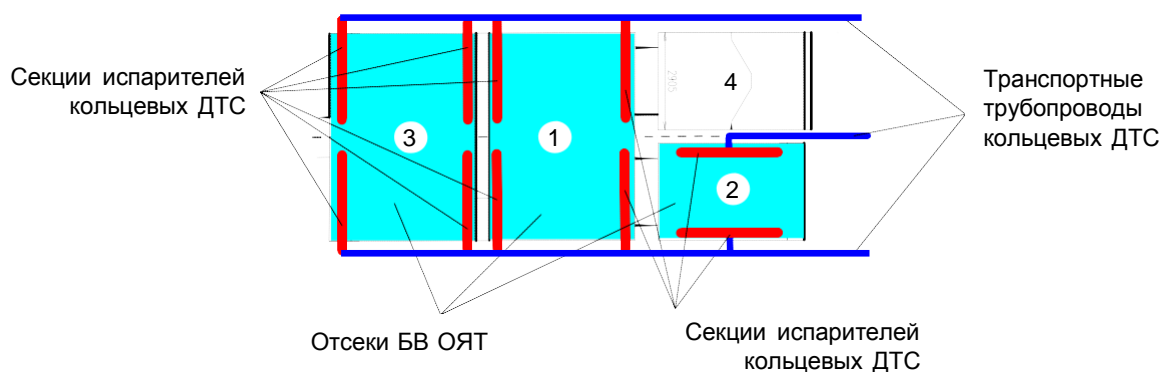


Рис. 4. Расположение испарителей термосифонной СПОТ БВ ОЯТ в отсеках БВ в реакторном отделении АЭС с ВВЭР-1000/В-320: 1–4 – отсеки БВ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внесены предложения по оптимизации компоновки СПОТ при проектировании. Показано, что, по своим характеристикам СПОТ БВ может быть использована не только как система безопасности при авариях, связанных с полным длительным обесточиванием энергоблока, но и как система нормальной эксплуатации.

Результаты расчета требуемых массогабаритных характеристик СПОТ БВ продемонстрировали принципиальную возможность их использования не только в перспективных проектах, но и при возможных модернизациях действующих энергоблоков с ВВЭР-1000.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Свириденко И. И. Система аварийного охлаждения ядерных энергоустановок на основе тепловых труб // Третья Всероссийская конференция по теплообменным процессам. 21–25 октября 2002. – М., МЭИ. – Т. 1. – С. 182–185.
2. ЕР37-2006.310.ОД (2). Запорожская АЭС. Энергоблок № 5. Отчет по анализу безопасности. Анализ запроектных аварий. База данных по ЯППУ для целей АЗПА. 2008.
3. Южно-Украинская АЭС. Энергоблок № 1. Анализ запроектных аварий. База данных по ЯППУ. 10/08-06.231.ОД.1. 2006.