

Х. М. Наффаа<sup>1</sup>, В. А. Герлига<sup>2</sup>,  
Д. В. Шевелев<sup>2</sup>, А. С. Балашевский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, Украина, г. Севастополь, Украина

<sup>2</sup>Служба научно-технической поддержки ОП НТЦ ГП НАЭК «Энергоатом», Украина, г. Севастополь, Украина

## Оценка эффективности системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки РУ с ВВЭР в условиях длительного обесточивания

Проведена оценка эффективности системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки реакторной установки в условиях длительного обесточивания энергоблока. Представлены результаты расчетного моделирования системы пассивного отвода тепла в зависимости от степени заполнения испарительного участка и температуры среды в защитной оболочке. Расчеты выполнялись с использованием кодов RELAP5/MOD3.4 и MELCOR 1.8.5.

**Ключевые слова:** система пассивного отвода тепла; защитная оболочка; двухфазный термосифон; атомная электрическая станция; реакторная установка; водо-водяной энергетический реактор.

**Х. М. Наффаа, В. А. Герлига, Д. В. Шевельов, О. С. Балашевський**

### Оцінка ефективності системи пасивного відводу тепла від захисної оболонки РУ з ВВЕР в умовах тривалого знеструмування

Проведено оцінку ефективності системи пасивного відводу тепла від захисної оболонки реакторної установки в умовах тривалого знеструмування енергоблока. Надано результати розрахункового моделювання системи пасивного відводу тепла залежно від ступеня заповнення випарної ділянки та температури суміші в захисній оболонці. Розрахунки проводилися з використанням кодів RELAP5/MOD3.4 і MELCOR 1.8.5.

**Ключові слова:** система пасивного відводу тепла; захисна оболонка; двофазний термосифон; атомна електрична станція; реакторна установка; водо-водяний енергетичний реактор.

© Х. М. Наффаа, В. А. Герлига, Д. В. Шевелев, А. С. Балашевский, 2013

Одними из наиболее опасных запроектных аварий (ЗПА) на АЭС являются аварии с наложением полного длительного обесточивания и потерей аварийных источников электроснабжения. Потеря всех аварийных источников электроэнергии на АЭС «Фукусима-1» из-за воздействия цунами, вызванного землетрясением 11 марта 2011 г., стала причиной развития тяжелых аварий с повреждением топлива и корпусов реакторов, а затем и защитных оболочек реакторов на трех энергоблоках. Потеря всех барьеров безопасности повлекла за собой выброс значительного количества радионуклидов в окружающую среду, в результате чего аварии был присвоен 7-й, высший уровень по международной шкале INES [1].

Сохранение целостности защитной оболочки (ЗО) — одна из приоритетных задач при возникновении аварийных ситуаций на АЭС [2]. ЗО реакторов всех типов имеют проектные ограничения по внутренним параметрам (давлению и температуре). При превышении проектных пределов возможен отказ ЗО с потерей локализирующей функции. Поддержание параметров в заданных пределах на современных АЭС реализуется активными системами, для работы которых требуется внешнее энергоснабжение.

На эксплуатируемых сегодня АЭС с ВВЭР-1000 технические средства для предотвращения повреждения ЗО в условиях аварий с полным длительным обесточиванием не предусмотрены. В эволюционных проектах РУ с ВВЭР, а также в новых проектах зарубежных АЭС предусмотрены пассивные системы снижения параметров под ЗО при таких авариях, но все эти системы обладают рядом недостатков, основные из которых — ограниченное время их работы, а также возможность байпасирования ЗО при отказах. Поэтому актуальность создания систем пассивного отвода остаточных тепловыделений (СПОТ) ГО и внедрения их на действующих энергоблоках АЭС, а также в проектах перспективных РУ, которые были бы избавлены от указанных недостатков, бесспорна.

**Схема, принцип работы и компоновка СПОТ ЗО.** Для решения указанной задачи предлагается схема СПОТ ЗО с использованием испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа — низкотемпературных кольцевых двухфазных термосифонов (ДТС). ДТС благодаря переносу скрытой теплоты парообразования своего промежуточного теплоносителя обеспечивает эффективный отвод теплоты от атмосферы ГО к конечному поглотителю. Испаритель кольцевого ДТС размещается вблизи купольной части ГО, конденсатор выводится за пределы гермообъема. Испаритель и конденсатор связаны между собой транспортными паровым и конденсатным трубопроводами (рис. 1).

Теплоотвод от атмосферы ЗО 2 к наружной поверхности испарителя 4 осуществляется естественной конвекцией, а затем от испарителя — к промежуточному теплоносителю. За счет внешнего подвода теплоты промежуточный теплоноситель ДТС испаряется, пар через сборный коллектор 9 поступает в паровой трубопровод 6, который через гермопроходки 8 выводится за пределы защитной оболочки 2 реакторной установки 1 и соединяется с конденсатором 5. Конденсатор 5 охлаждается потоком атмосферного воздуха через воздушный канал 3, при этом пар в конденсаторе конденсируется и по конденсатному трубопроводу 7 и разводящему коллектору 10 возвращается в испаритель 4.

Все элементы испарителя ДТС выполнены из пластин и расположены вблизи внутренней поверхности ЗО. Испарители СПОТ практически не отбирают полезного объема ЗО.

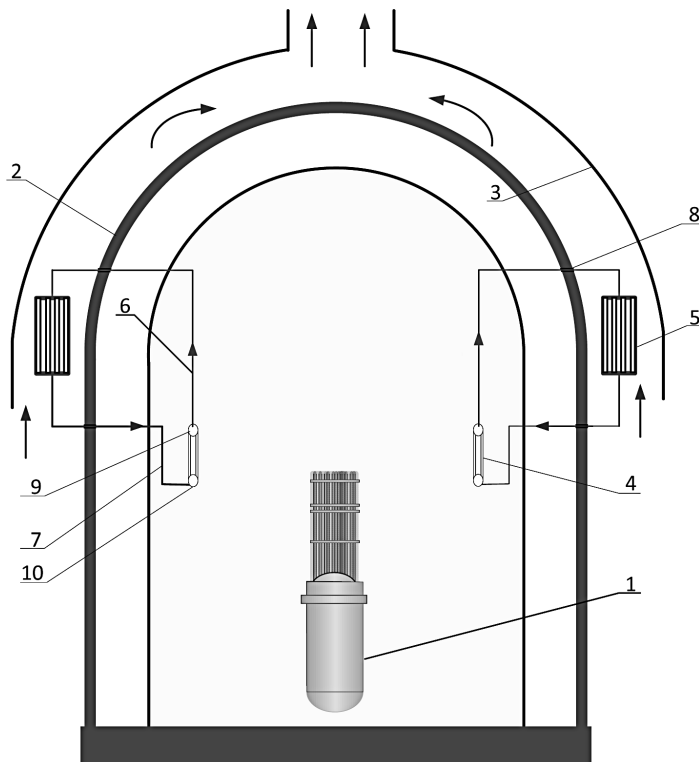


Рис. 1. Схема автономной СПОТ ЗО на основе кольцевого ДТС:

1 — реакторная установка; 2 — защитная оболочка; 3 — воздушный канал; 4 — испаритель; 5 — конденсатор; 6 — паровой трубопровод; 7 — конденсатный трубопровод; 8 — гермопроходка; 9 — сборный коллектор; 10 — раздающий коллектор

Теплоотводящая способность СПОТ ЗО рассчитывается так, чтобы при всех возможных состояниях энергоблока, включая запроектные аварии с разрывами трубопроводов первого контура и паропроводов острого пара при работе на мощности, не допустить роста параметров в ЗО сверх допустимых пределов. Например, для ЗО РУ ВВЭР-1000 — это давление не более 5 бар (абс.) и температура парогазовой смеси не выше 150 °С. При этом температура окружающего воздуха принимается максимально возможной для площадки АЭС, например до +45 °С.

ДТС, являясь автономными замкнутыми устройствами теплоотвода, надежно разделяют ЗО и конечный поглотитель, что обеспечивает радиационную безопасность в аварийной ситуации. СПОТ ЗО для повышения надежности работы состоит из автономных секций, скомпонованных в нескольких параллельных каналах, чем обеспечивается необходимая степень резервирования.

Перед заполнением промежуточным теплоносителем кольцевой термосифон вакуумируется для удаления неконденсируемых газов. В процессе работы устройства давление насыщенных паров воды во всем диапазоне температур и в любой точке контура будет ниже атмосферного. Поэтому при возможных течах контура СПОТ исключается выход радионуклидов из ЗО в атмосферу. Обнаружив течь, в условиях нормальной эксплуатации персонал имеет возможность выявить и перекрыть локализирующую арматуру поврежденной теплообменной секции или одного из нескольких каналов системы. При этом, поскольку теплообменная поверхность секций СПОТ ЗО в процессе проектирования выбирается избыточной по отношению к максимально возможной тепловой нагрузке на

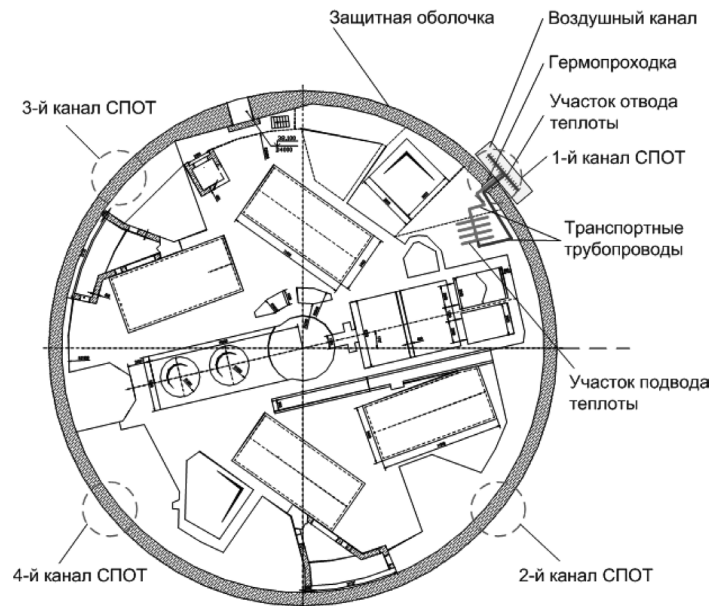


Рис. 2. Расположение элементов СПОТ ЗО в реакторном отделении

ЗО, система продолжает выполнять функцию теплоотвода в полном объеме.

В качестве промежуточного теплоносителя ДТС, кроме воды, могут также использоваться жидкости с пониженной температурой замерзания, что предотвращает замерзание промежуточного теплоносителя СПОТ в условиях низких температур окружающего воздуха.

При расчетном моделировании СПОТ анализировалось влияние степени заполнения испарительного участка водой на эффективность системы.

Возможная схема расположения элементов СПОТ ЗО в реакторном отделении АЭС с ВВЭР-1000 изображена на рис. 2.

Для вывода транспортных трубопроводов через гермооболочку в существующих РУ с ВВЭР-1000 возможно использование двух из имеющихся шести гермопроходок Ду 1600 мм системы вентиляции реакторного отделения. Однако этот вариант не оптимален, так как испарители окажутся размещенными слишком низко, из-за чего под куполом реакторного отделения возможно образование «застойных» зон паровоздушной смеси, плохо охлаждаемых за счет естественного конвективного перемешивания воздуха в ЗО. В новых проектах РУ с ВВЭР для вывода транспортных трубопроводов кольцевого ДТС необходимо предусмотреть дополнительные гермопроходки, что несложно сделать на этапе проектирования и строительства ЗО, разместив испарители ДТС непосредственно под куполом ЗО.

**Расчетная модель и характеристики термосифонного контура СПОТ ЗО.** Расчетное моделирование контура СПОТ ЗО выполнено с использованием кодов RELAP5/MOD3.4 и MELCOR 1.8.5.

При моделировании рассматривался двухфазный контур, состоящий из испарительного и конденсационного участков (теплообменники в ЗО и за пределами ЗО, соответственно) и двух транспортных участков — паропровода от испарителя к конденсатору и возвратного трубопровода конденсата. Разность высотных отметок испарителя и конденсатора в расчете принята равной 15 м, что соответствует

реальной компоновке СПОТ 30 в составе реакторного отделения энергоблока РУ с ВВЭР-1000. Упрощенная нодализационная схема модели кольцевого ДТС представлена на рис. 3.

При разработке модели в качестве испарителя рассматривалась плоская теплообменная пластина  $150 \times 20$  мм с толщиной 1 мм. Высота испарителя принята равной 2,5 м.

Оптимальное заполнение испарительной пластины определялось в процессе расчетного моделирования с целью обеспечения максимальной эффективности испарителя по уровню отводимой мощности.

Длина теплообменной пластины испарителя выбрана из условия незначительных размеров и массы теплообменной секции, что облегчает ее крепление к стенке ГО. Кроме того, расчетами установлено, что при значительном увеличении длины пластины удельная отводимая мощность с единицы длины начинает снижаться, поскольку зона испарения теплоносителя в пластине имеет ограниченную протяженность. Конденсатор в расчетной модели также представлял собой одну или несколько теплообменных пластин аналогичных размеров.

Согласно предварительным оценкам, предлагается устанавливать четыре канала, каждый из которых содержит четыре секции испарительных пластин указанных размеров. При меньшем количестве пластин увеличивается количество секций и каналов системы, а также требуется герметичных проходов через ЗО, что повышает вероятность возникновения отказов системы. При большем — увеличивается необходимый диаметр паропроводов и, соответственно, размеры гермопроходов во внешней стене ЗО. Диаметр паропровода в предварительных расчетах принят равным  $D_u 100$  мм. Диаметр возвратного трубопровода конденсата, ввиду значительно большей плотности воды и малых скоростей движения среды по сравнению с движением среды в паровом трубопроводе, гораздо меньше —  $D_u 50$  мм. В расчетной модели паропровод и возвратный трубопровод конденсата по сечению были отмасштабированы, т. е. приведены к сечению одной испарительной пластины.

При моделировании термосифонного контура СПОТ задавались граничные условия 3-го рода на внешней поверхности испарительной и конденсационной пластин. Температура воздуха в ЗО вблизи внешней поверхности принята равной  $+90...150$  °С, что, по условию поставленной задачи, близко к максимально допустимой установившейся температуре парогазовой смеси в верхней части ЗО при постулируемых проектных авариях.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  для внешней поверхности принят равным  $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , что является умеренно-консервативно заниженной оценкой при обтекании пластин неконденсируемым газом (воздухом) со скоростью около 1 м/с. Значение скорости для условий конвективного обтекания пластин, в свою очередь, получено при помощи кода MELCOR 1.8.5.

Эффективный коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности пластины-конденсатора  $\alpha_2$  принят равным  $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Данное значение, при обдуве конденсатора атмосферным воздухом в специально предусмотренных тяговых каналах между внешней и внутренней оболочками ЗО, вполне достижимо в случае использования пластин с развитой внешней поверхностью теплообмена (например, при наличии оребрения).

Кроме того, в реальных условиях конденсатор, расположенный вне гермообъема, мало ограничен в габаритах

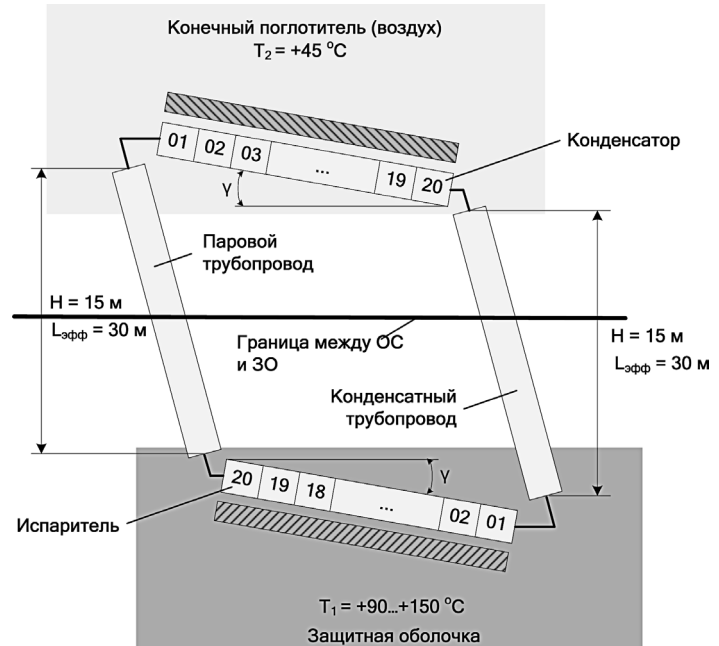


Рис. 3. Нодализационная схема термосифонного контура

и может быть набран из гораздо большего числа теплообменных пластин, чем испаритель. Это допускает соответствующее снижение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$ , компенсируемое увеличением теплообменной поверхности.

Температура окружающего воздуха в расчете принималась равной  $+45$  °С, что соответствует максимальной зарегистрированной в летнее время года для площадок АЭС Украины за весь период метеонаблюдений.

По длине испарительная и конденсационная пластины разбивались на 20 расчетных участков. Это позволило достаточно точно учесть изменение паросодержания и режимов теплообмена стенки с теплоносителем внутри пластины.

Основные расчетные параметры в установившемся режиме приведены на рис. 4—6. При расчетах варьировалась степень заполнения испарительного участка в установившемся режиме.

Как показали предварительные расчеты, в диапазоне заполнения испарительного участка от 10 до 20 % в установившемся режиме эффективность СПОТ слабо зависит от изменений (флуктуаций) степени заполнения, которые характерны для режима кипения в ДТС. При этом оптимальное заполнение испарителя составляет 13—15 % (350—400 кг) для всех испарительных участков теплообменных пластин.

Результаты расчетного моделирования показали, что тепловая мощность, отводимая одной секцией пластины, при оптимальном заполнении контура во всех случаях составляет не менее 1,75—4,5 МВт (рис. 4). При этом расход среды в системе при оптимальном заполнении испарительного участка составляет не менее 2,5—4,0 кг/с (рис. 5).

Таким образом, одна теплообменная секция испарителя, состоящая из пластины, расположенной в коллекторах с шагом 20 мм, может отводить около 4,8 МВт из ЗО в атмосферу, что близко к суммарным тепловым потерям со всего оборудования РУ в ЗО при работе на номинальном уровне мощности.

При условии, что в ЗО будет установлено четыре испарительные секции (например, по четыре секции на один

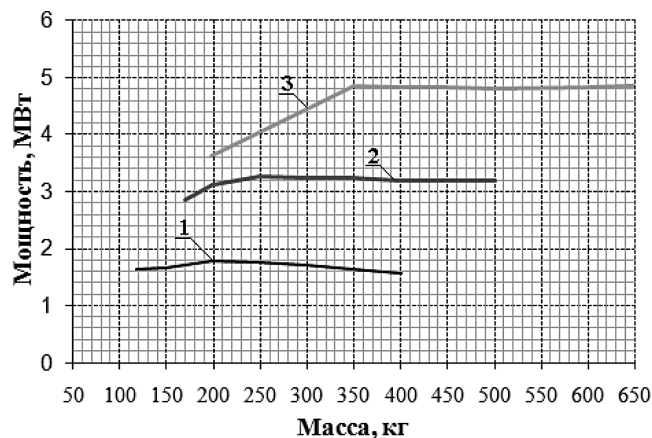


Рис. 4. Тепловая мощность, отводимая одной пластиной испарителя в зависимости от относительной степени заполнения испарительного участка и температуры в ЗО: 1, 2, 3 — температура в ЗО 90, 120 и 150 °С, соответственно

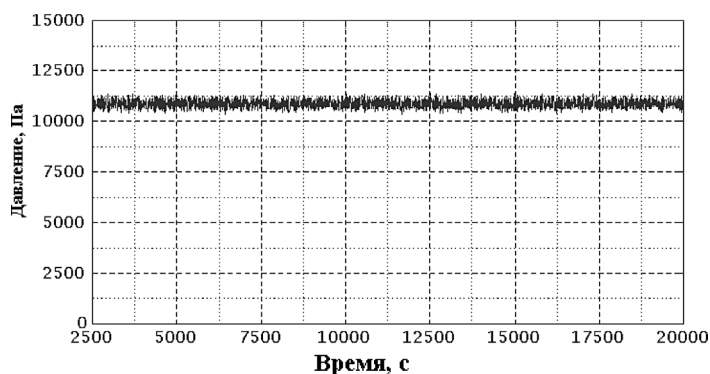


Рис. 6. Давление (абсолютное) на входе в конденсатор

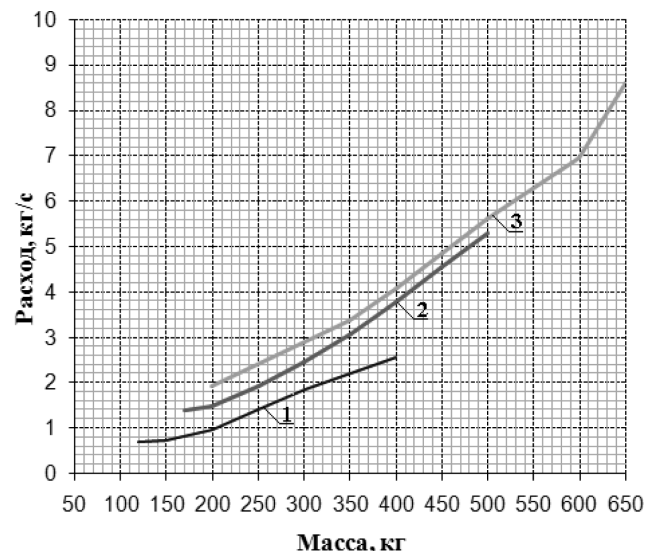


Рис. 5. Изменение расхода среды в зависимости от относительной степени заполнения испарительного участка и температуры в ЗО: 1, 2, 3 — температура в ЗО 90, 120 и 150 °С, соответственно

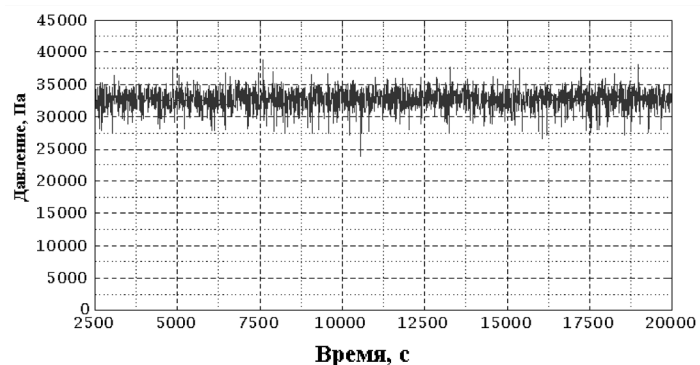


Рис. 7. Давление (абсолютное) на входе в испаритель

канал в четырехканальном исполнении СПОТ), и допущении отказа одной из них (например, изоляция от общего контура вследствие обнаруженной протечки), оставшиеся три способны при наихудших граничных условиях отвести не менее 58 МВт тепловой мощности из-под ЗО, что соответствует мощности в ЗО при запроектной аварии с потерей теплоносителя в условиях длительного обесточивания энергоблока.

Как показали результаты расчета при помощи кода MELCOR 1.8.5, параметры в ЗО ни при каких из постулируемых аварий не успевают достигнуть проектных пределов, которые угрожали бы целостности ЗО.

Следует учесть, однако, что значительную часть теплоты в случаях, когда авария не развивается до степени тяжелой, будут отводить аварийные системы охлаждения первого контура реактора (в перспективных проектах — СПОТ РУ). Таким образом, предлагаемая схема СПОТ ГО в этом случае обладает значительным коэффициентом запаса по отводимой тепловой мощности.

Оптимизация схемы СПОТ (например, использование паропроводов и арматуры несколько большего диаметра, оптимизация испарительной части контура с целью увеличения количества испарительных пластин при одновременном

уменьшении размеров одной пластины и т. п.) позволит, согласно имеющимся оценкам, поднять эффективность секции не менее чем на 20–25 % и, таким образом, обеспечить теплоотвод от ЗО с максимально возможной тепловой нагрузкой с требуемым коэффициентом запаса, т. е. даже при крайне маловероятных гипотетических тяжелых авариях.

Поскольку температура пароводяной смеси в любой точке контура кольцевого ДТС в течение всего времени остается ниже +100 °С, термосифонный контур СПОТ постоянно находится под разрежением как по отношению к гермообъему, так и по отношению к окружающей среде (рис. 6 и 7), что, при возникновении неплотностей в любой точке контура ДТС, исключает выход активности из-под ЗО в окружающую среду.

Таким образом, полученные расчетные характеристики подтверждают возможность обеспечения эффективного и безопасного теплоотвода от ГО двухфазным кольцевым термосифоном с водяным теплоносителем. Даже при незначительном температурном напоре (разности температур) между участками подвода и отвода теплоты, реализуемый в ДТС механизм теплопереноса обеспечит надежный отвод теплоты от ГО конечному поглотителю — атмосферному воздуху.

## Выводы

1. Анализ системы пассивного отвода тепла от ЗО подтверждает возможность создания эффективных СПОТ ЗО на основе кольцевых термосифонных контуров.

2. Использование термосифонного теплообменного оборудования способствует, даже при малых температурных напорах, эффективному и безопасному отводу теплоты из ЗО к конечному поглотителю.

3. Разработка, более детальное исследование и оптимизация характеристик СПОТ ЗО требуют создания полной расчетной модели с совместным использованием кодов RELAP5/MOD3.4 и MELCOR 1.8.5, а также на этапе предпроектной подготовки — создания теплофизических стендов для определения удельных характеристик системы с последующей проверкой результатов на полномасштабном экспериментальном стенде.

4. Внедрение СПОТ ЗО в состав систем безопасности РУ позволит исключить возможность повреждения ЗО в условиях проектных и запроектных аварий, независимо от состояния источников внешнего и аварийного электропитания энергоблока.

## Список использованной литературы

1. *Gauntt Randall*. Fukushima Daiichi Accident Study Report / Randall Gauntt, Donald Kalinich, Jeff Cardoni [et al.] // Sandia National Laboratories. — 2012. — 298 p.
2. Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants: IAEA safety standards series. — No. NS-G-1.10. — 2004. — 127 p.
3. *Наффаа Х. М.* Пассивные системы охлаждения защитных оболочек реакторных установок / Х. М. Наффаа, И. И. Свириденко, Д. В. Шевелев // 36. науч. пр. СГУЯУтаП. — 2012. — Вип. 2(42). — С. 46–55.
4. *Lee S.-W.* Assessment of Passive Containment Cooling Concepts for Advanced Pressurized Water Reactors / S.-W. Lee [et al.] // Ann. Nucl. Energy. — 1997. — Vol. 24, No. 6. — P. 467–475.
5. Passive Safety system and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1624. — Vienna: IAEA, 2009. — 159 p.
6. Description of natural circulation and passive safety systems in water cooled Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-DRAFT. — Vienna: IAEA, 2004. — 112 p.

Отримано 12.04.2013.