

УДК 621.039.586

И.И. Свириденко, доцент, канд. техн. наук,

В.А. Тимофеев, ст. преподаватель

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: i.sviridenko@mail.ru

Д.В. Шевелев, канд. техн. наук, зам. главного инженера

«Атомэнергосервис»

ул. В. Стуса, 35/37, г. Киев, Украина, 03142

E-mail: am5x86@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ КОНЕЧНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ СПОТ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ВВЭР-1000

Рассматривается схема тепловой защиты конечного поглотителя системы пассивного отвода остаточных тепловыделений реакторной установки АЭС с ВВЭР-1000. Представлены результаты расчетного моделирования системы и ее характеристик, полученных для различных эксплуатационных условий.

Использование воды в качестве конечного поглотителя остаточных тепловыделений реакторной установки (РУ) сталкивается с необходимостью ее тепловой защиты при угрозе замерзания в условиях низкой температуры окружающего воздуха. Причем, эта особенность характерна не только для АЭС в северных и средних широтах. В Украине, например, в местах расположения площадок АЭС, минимальная температура может достигать значений $-34...-36$ °C, а максимальная продолжительность периода со средней температурой воздуха ≤ 0 °C составляет более трех месяцев [1]. Как показал январь 2006 г., даже для юга Украины и Крыма возможны периоды, когда температура воздуха на уровне -20 °C и ниже может держаться более двух недель. Абсолютный минимум температуры для Украины зарегистрирован на отметке $-41,9$ °C.

При компоновке системы пассивного отвода теплоты (СПОТ) емкости с конечным поглотителем – баки аварийного отвода теплоты (БАОТ) выносятся за пределы защитной оболочки (ЗО), поэтому в зимний период существует опасность замерзания воды в БАОТ с последующим ограничением функционирования СПОТ из-за потери конечного поглотителя при нарушении герметичности элементов бака и трубопроводов. В связи с этим необходима система тепловой защиты, исключающая замерзание БАОТ в режиме ожидания СПОТ при понижении температуры окружающего воздуха ниже 0 °C, что обеспечит постоянную эксплуатационную готовность всех элементов системы безопасности (СБ). Так как сама система должна относиться к категории систем нормальной эксплуатации и систем, важных для безопасности, то она должна обладать высокой надежностью, эффективностью и экономичностью.

Авторами статьи разработана такая система, удовлетворяющая всем перечисленным требованиям [2]. Особенностью системы является то, что она не имеет специального оборудования. Предотвращение замерзания воды в БАОТ осуществляется ее постоянным подогревом от 1-го контура РУ. Причем, отбор теплоты реализуется пассивным образом благодаря циркуляции греющего теплоносителя за счет разности давлений между горячим и холодным участками главного циркуляционного контура (ГЦК). Таким образом, предлагаемая система может быть отнесена к категории пассивных систем безопасности.

Целью статьи является обсуждение результатов расчетного моделирования предлагаемой системы и ее характеристик, полученных для различных эксплуатационных условий. На рисунке 1 изображена схема пассивной тепловой защиты конечного поглотителя. Перенос теплоты 1-го контура осуществляется с помощью находящейся в режиме ожидания СПОТ через термосифонный теплообменник аварийного расхолаживания (ТОАР) 4, промконтур и теплообменник-конденсатор (ТК) 6, размещенный в БАОТ 8. Теплота 1-го контура подводится к БАОТ постоянной продувкой термосифонного ТОАР 4 теплоносителем 1-го контура. Для продувки предусмотрены байпасные участки 16 и 23, расположенные параллельно подъемному 2 и опускному 3 трубопроводам СПОТ, и врезанные, соответственно, в трубопроводы 13 и 14 системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ). Продувка реализуется за счет образующегося при работе главного циркуляционного насоса (ГЦН) 27 перепада давления между трубопроводами САОЗ 13 и 14, соединенными с нижней и верхней смесительными камерами реактора.

Продувка ТОАР выполняется по следующей схеме: от нижнего трубопровода САОЗ 13, в котором давление 1-го контура соответствует давлению нагнетания ГЦН, через байпасный трубопровод 16, дроссельную шайбу 24, подъемный трубопровод петли СПОТ 2, ТОАР 4, байпасный трубопровод 23, в верхний трубопровод САОЗ 14. При этом теплота теплоносителя 1-го контура через зону теплоподвода ТОАР передается промежуточному теплоносителю ДТС. Далее от ДТС в зоне теплоотвода ТОАР теплота передается теплоносителю промежуточного теплоотводящего контура (ПТК), представляющего

собой кольцевой ДТС. После испарения жидкого теплоносителя промконтура в межтрубном пространстве зоны теплоотвода ТОАР пар по трубопроводу 5 поступает в ТК 6, где конденсируются за счет отвода теплоты конечному поглотителю 7. Конденсат промконтура по трубопроводу 9 возвращается в ТОАР 4. Таким образом, за счет постоянного подвода теплоты от РУ к БАОТ поддерживается температура конечного поглотителя выше точки замерзания. Причем, для подогрева воды в БАОТ используется тракт циркуляции теплоносителя 1-го контура, минуя реактор и ПГ.

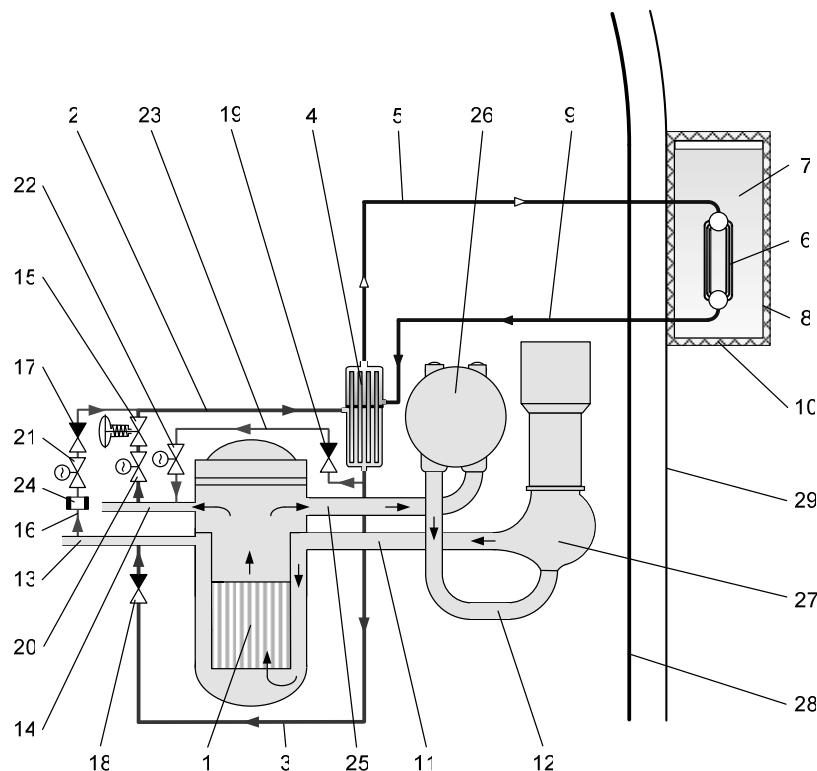


Рисунок 1 – Схема пассивной тепловой защиты конечного поглотителя:

1 – реактор; 2, 3 – подъемный и опускной трубопроводы петли СПОТ; 4 – ТОАР; 5 – паровой трубопровод промконтура; 6 – ТК; 7 – конечный поглотитель; 8 – БАОТ; 9 – конденсатный трубопровод промконтура; 10 – теплоизоляция; 11, 25 – «холодный» и «горячий» трубопроводы ГЦК; 12 – всасывающий трубопровод ГЦН; 13, 14 – нижний и верхний трубопроводы САОЗ; 15 – ГЗК СПОТ; 16, 23 – «горячий» и «холодный» трубопроводы продувки; 17, 18, 19 – невозвратные клапаны; 20, 21, 22 – клапаны с электроприводом; 24 – дроссельная шайба; 26 – ПГ; 27 – ГЦН; 28 – контеймент; 29 – ЗО

Режим пассивной тепловой защиты БАОТ реализуют только при низкой температуре окружающего воздуха. В условиях отсутствия опасности замерзания конечного поглотителя продувку ТОАР прекращают, перекрывая арматуру 21 и 22 на соответствующих байпасных трубопроводах 16 и 23.

С целью получения теплофизических характеристик состояния конечного поглотителя при функционировании пассивной тепловой защиты была разработана расчетная модель БАОТ, нодализационная схема которого изображена на рисунке 2. Моделирование реализовано с использованием стандартного теплогидравлического кода RELAP5/MOD3.2.

Объем воды в баке для одной петли СПОТ составляет 400 м^3 . Бак рассматривался как сегмент с основанием $1,0 \times 20 \text{ м}$ и высотой 20 м , расположенный на наружной поверхности ЗО реакторного отделения. Объем бака моделировался гидравлическим элементом (ГЭ) типа PIPE P-991(992, 993, 994), состоящим из 18 расчетных объемов 01...18, расположенных вертикально в виде замкнутого кольцевого контура.

Теплообменная поверхность ТК одной петли СПОТ, составляющая 170 м^2 , сформирована из 1200 вертикальных труб размером $(18 \times 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и высотой $2,5 \text{ м}$, представлена тепловой структурой HS-654. Для обеспечения максимальной продолжительности времени ее нахождения под уровнем воды, ТК расположен в нижней части бака в расчетном объеме 01 БАОТ при давлении $P_{\text{нач}} = 0,12 \text{ МПа}$. Теплоотвод от наружной поверхности ТК осуществляется при свободной конвекции конечного поглотителя. Со стороны промконтура ТК моделировался ГЭ типа PIPE и для упрощения расчетной схемы имел один расчетный объем P-654 (664, 674, 684) высотой $2,5 \text{ м}$.

В расчетных объемах с 01 по 08 моделировался подъемный конвективный поток недогретой жидкости, в расчетных объемах с 11 по 18 – опускной поток недогретой жидкости. В расчетных объемах 09 и 10 в режиме ожидания – воздух под атмосферным давлением, в режиме тепловой защиты конечного поглотителя и отвода остаточных тепловыделений РУ – насыщенный пар, контактирующий через воздушный объемом БАОТ (ГЭ 999) с атмосферным воздухом (ГЭ 990 – объем бесконечных размеров).

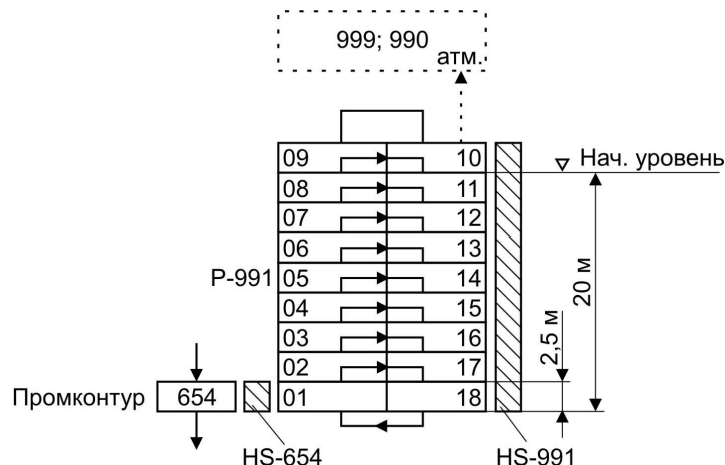


Рисунок 2 – Нодализационная схема БАОТ с ТК

Таким образом, кольцевая модель БАОТ имела строгое разграничение областей подъемного и опускного течения, но учитывала процессы тепло-массопереноса между расчетными объемами с 01 по 09 и с 18 по 10, соответственно. Причем, для получения скорости конвективного потока жидкости вдоль теплообменной поверхности ТК, а также в расчетных объемах с восходящим потоком до 0,1 м/с, сечение всех расчетных объемов области подъемного течения Р-991(01...09) принималось равным 2 м². Соответственно, сечение расчетных объемов с опускным течением Р-991(10...18) составляло 18 м².

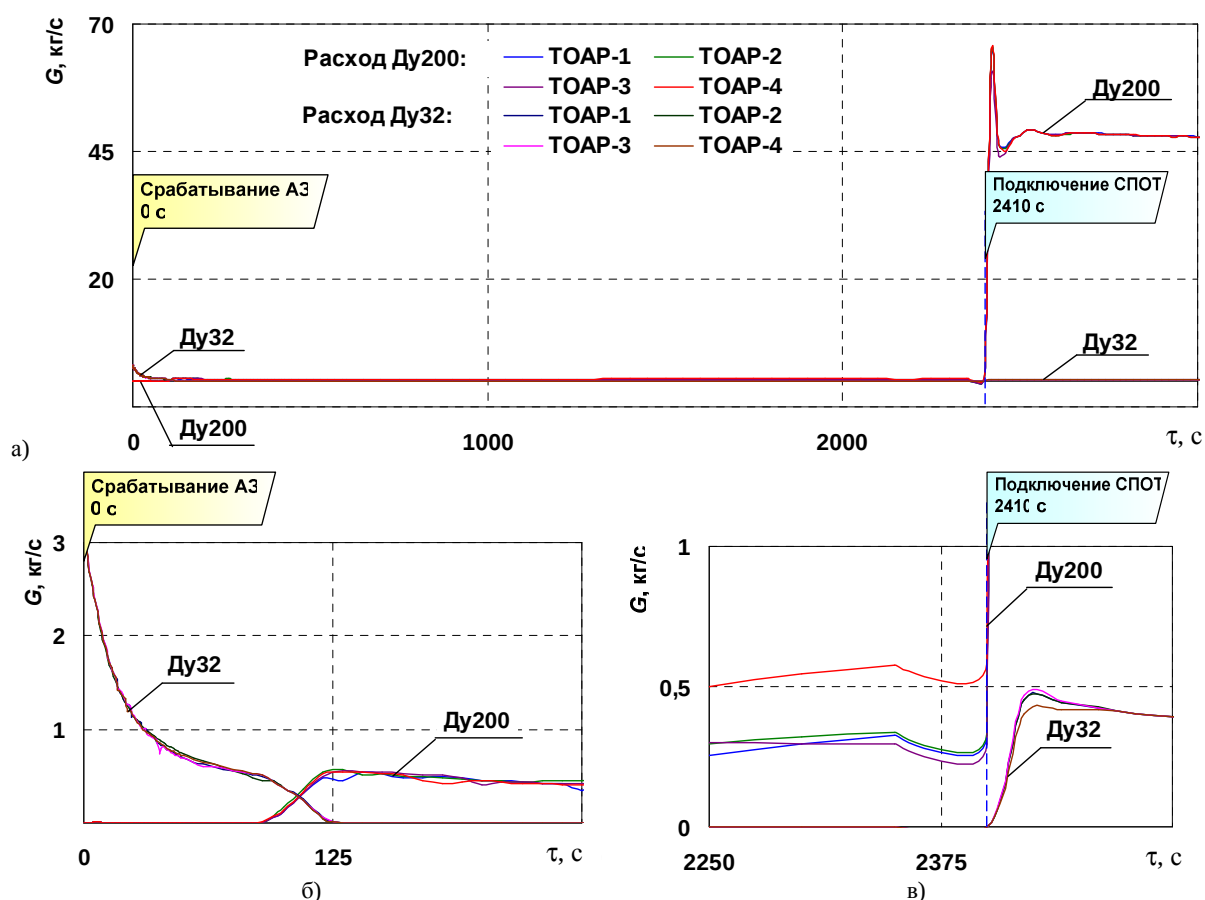
Кроме того, по мере снижения уровня воды при ее испарении из бака «режим испарения» назначался сначала на границе расчетных объемов (08, 11) и (09, 10), далее на границе (07, 12) и (08, 11), затем на границе (06, 13) и (07, 12), и т.д., вплоть до границы нижних расчетных объемов (01, 18) и (02, 17). Это позволило более корректно выполнить расчет и достаточно точно оценить максимальное время испарения конечного поглотителя в БАОТ.

Внешняя стенка БАОТ моделировалась тепловой структурой HS-99, имеет толщину 5 мм, материал – нержавеющая сталь. Для расчета тепловых потерь через стенку бака учитывались рекомендации [3], согласно которым коэффициент теплоотдачи наружному воздуху принимался равным 50 Вт/м²·К.

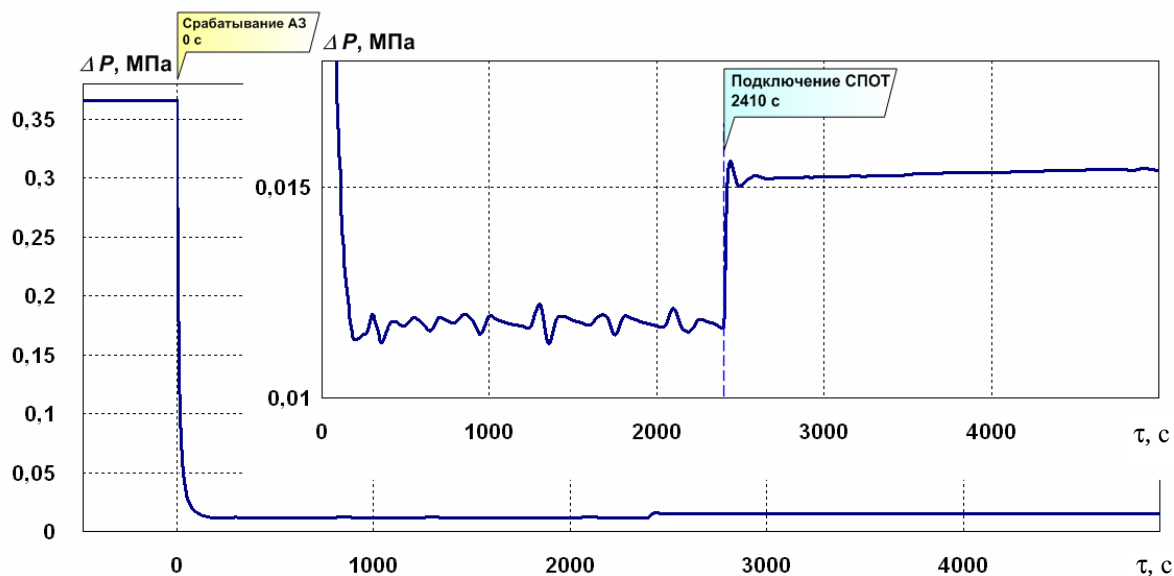
При аварийной ситуации с обесточиванием СПОТ подключается к РУ с помощью автоматического открытия главного запорного клапана (ГЗК) 15. Если ввод в действие СПОТ происходит во время режима тепловой защиты БАОТ, перетока теплоносителя 1-го контура с верхнего трубопровода 14 САОЗ в нижний трубопровод 13, минуя ТОАР, не происходит, благодаря невозвратному клапану 17. Циркуляция теплоносителя по петлям СПОТ будет осуществляться только в направлении, указанном на рисунке 1 стрелками, что подтверждается результатами расчетного моделирования изменения расхода в трубопроводах продувки Ду32 и расхолаживания Ду200 после срабатывания аварийной защиты (АЗ) и подключения СПОТ (рисунок 3, а).

Через 125 с после срабатывания АЗ циркуляция по байпасному трубопроводу 23 Ду32 прекращается из-за падения движущего напора после останова ГЦН. До подключения СПОТ циркуляция 1-го контура продолжается по трубопроводу 3 Ду200 (рисунок 3, б). С вводом в действие СПОТ на 2410 секунде режим тепловой защиты конечного поглотителя завершается, и в его продолжении необходимости больше нет, так как вода в БАОТ нагревается уже за счет функционирования СПОТ (рисунок 3, в).

По сравнению со схемой постоянного подогрева конечного поглотителя в БАОТ от общестанционных систем АЭС [4] рассмотренный способ имеет ряд существенных преимуществ, основное из которых – повышенная надежность тепловой защиты. Вода в БАОТ в нашем случае подогревается пассивно, т.е. способ реализуется за счет основных технологических процессов РУ без использования каких-либо внешних источников теплоты и дополнительных насосов для циркуляции греющего теплоносителя.



На рисунке 4 показан уровень располагаемого перепада давления в петле продувки ТОАР и характер его изменения (в увеличенном масштабе) во время срабатывания АЗ реактора и подключения СПОТ. Перепад давления до момента срабатывания АЗ соответствует напору, создаваемому работающим ГЦН в петле продувки в режиме тепловой защиты при НЭ. Этого напора достаточно для постоянной продувки термосифонного ТОАР теплоносителем 1-го контура через байпасный трубопровод.



Подвод теплоты к БАОТ за счет переноса скрытой теплоты парообразования промежуточных теплоносителей ДТС ТОАР и двухфазного промконтура позволяет добиться высокой эффективности тепловой защиты при общем низком термическом сопротивлении системы с минимальными потерями теплоты РУ. Тепловая мощность, необходимая для обеспечения подогрева конечного поглотителя в БАОТ, не превышает 0,06 % номинальной тепловой мощности РУ и соизмерима с уровнем тепловых потерь РУ в гермообъем [5]. Термическое сопротивление системы, благодаря высокой интенсивности теплоотдачи при испарении и конденсации промежуточных теплоносителей ДТС и промконтура, будет определяться термическим сопротивлением стенок термосифонной сборки ТОАР и ТК, а также теплоотдачей от ТК в БАОТ. На рисунке 5 приведены значения коэффициентов теплоотдачи от наружной поверхности ТК конечному поглотителю. Как на этапе тепловой защиты, так и в условиях отвода остаточных тепловыделений РУ интенсивность теплоотдачи воде БАОТ соответствует режиму свободной конвекции. Отсутствие кипения конечного поглотителя на поверхности ТК подтверждается достаточным запасом до температуры насыщения (рисунок 6).

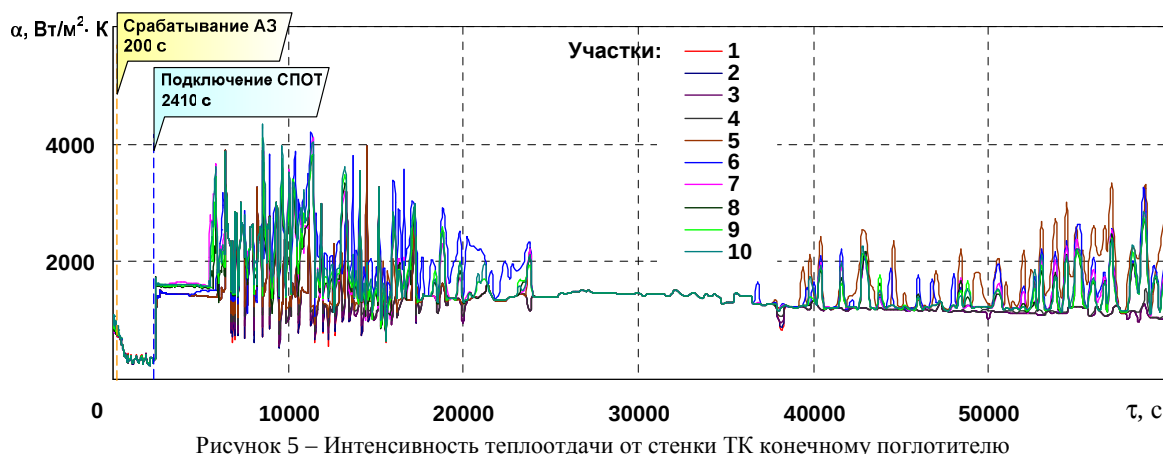


Рисунок 5 – Интенсивность теплоотдачи от стенки ТК конечному поглотителю

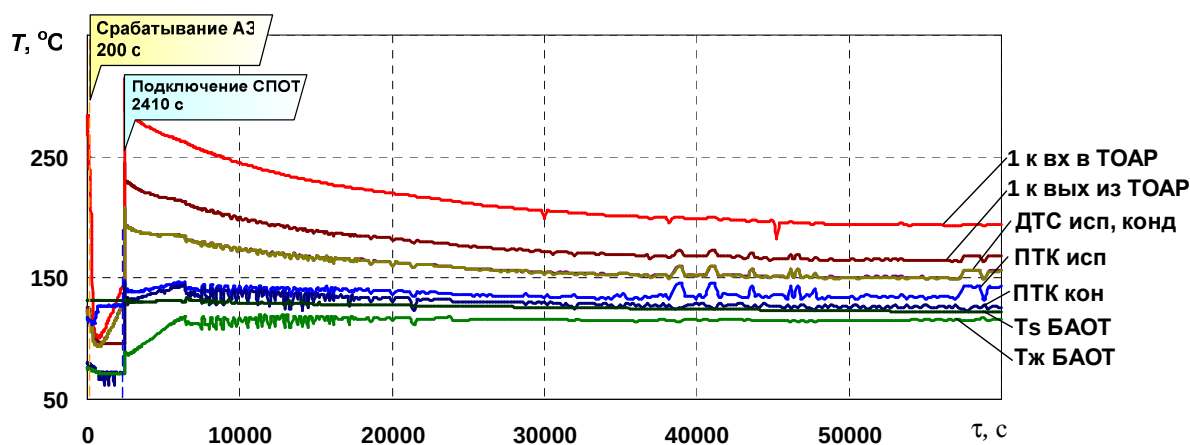


Рисунок 6 – Температура в контурах СПОТ и в БАОТ:

1 к – 1-ый контур; вх – вход; вых – выход; исп – испаритель; кон – конденсатор;
s – на линии насыщения; ж – жидкость

На рисунке 7 показаны результаты расчета тепловых потерь РУ в режиме тепловой защиты БАОТ. Расчетное моделирование выполнено для условий наружного воздуха (-5) °C. Это значение выбрано на основе анализа климатических параметров холодного периода года, составляющего, например, для Запорожской, Николаевской, Ровенской и Хмельницкой областей Украины три месяца и более с температурой ($-2,2...-3,6$) °C [1]. Результаты расчетного моделирования показывают, что для надежной тепловой защиты БАОТ РУ с ВВЭР-1000, например, в климатических условиях Украины, уровень тепловых потерь составит 0,9...0,93 МВт, а для условий Крайнего Севера – 9,4...10,3 МВт. В целом количество теплоты для подогрева воды в БАОТ в различных климатических условиях эксплуатации АЭС, не превысит 0,03...0,3 % номинальной тепловой мощности РУ с ВВЭР-1000.

Регулирование теплоподвода к конечному поглотителю в БАОТ осуществляется дросселированием продувки термосифонного ТОАР в диапазоне от 15 до 32 мм. Влияние проходного сечения дроссельной шайбы на величину теплоотвода от РУ, необходимого для тепловой защиты БАОТ, показано на рисунке 7, а уровень составляющих при этом тепловых потерь РУ представлен в таблице.

Таким образом, предложенный способ тепловой защиты от замерзания воды в БАОТ ее пассивным нагревом за счет отбора теплоты от РУ, используя постоянную продувку термосифонного ТОАР находящейся в режиме ожидания СПОТ, обеспечивает безопасность эксплуатации АЭС в любых климатических условиях, повышает надежность СПОТ и ее постоянную эксплуатационную готовность, высокий уровень радиационной и экологической безопасности, эффективности и экономичности. Совмещение двух функций: аварийной системы безопасности и системы нормальной эксплуатации в одной системе, существенно повышает компактность и экономичность ЯЭУ, так как отпадает необходимость в установке отдельной активной системы тепловой защиты, что снижает строительную стоимость РУ, сокращает затраты на собственные нужды, ремонтное обслуживание.

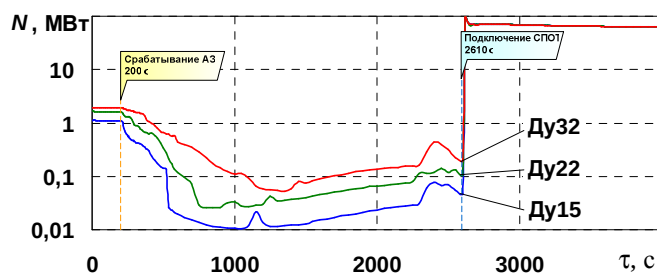


Рисунок 7 – Влияние дросселирования продувки на уровень теплоотвода от РУ

Таблица 1 – Уровень тепловых потерь РУ для тепловой защиты БАОТ

Ду, мм	Теплоотвод, МВт	Тепловые потери, %
15	1,05	0,03
22	1,68	0,05
32	1,91	0,06

Полученные расчетным методом характеристики системы тепловой защиты позволяют установить, что в среднем, для поддержания температуры конечного поглотителя в БАОТ на уровне, не ниже +5 °С, при температуре атмосферного воздуха (–5...–10) °С, отбор теплоты от РУ необходим на уровне не выше 4...6 МВт, что составляет 0,13...0,2 % номинальной мощности РУ с ВВЭР-1000.

Определение характеристик системы тепловой защиты БАОТ для других типов РУ, а также АЭС, эксплуатируемых в иных климатических условиях, требует соответствующего изменения расчетной модели, что является предметом последующего исследования.

Библиографический список

1. Строительная климатология (часть 1) [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные (197836 bytes). — Режим доступа: <http://meteocenter.net/meteolib/snip1.htm> Monday, 3 March 2008 11:07:08.
2. Спосіб пасивного теплового захисту від замерзання води в баку аварійного відведення теплоти: пат. 32984 Україна, МПК⁸ G 21 C 15/00, G 21 C 15/18 / І.І. Свириденко, Д.В. Шевелев, В.О. Тимофєєв. — № u 2008 00736; заявл. 21.01.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11. — 3 с.
3. Lerchl G. ATHLET Mod 2.1 Cycle A. User's Manual. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH / G. Lerchl, H. Austregesilo // GRS-P-1. — Vol. 1. — Rev. 4. — July 2006. — 656 p.
4. Обоснование конструктивных и технологических решений, применяемых в пассивной системе отвода тепла через парогенераторы / И.В. Кухтевич [и др.] // Процессы тепломассообмена и гидродинамики в системах безопасности АЭС с ВВЭР-640: сб. тр. — СПб: АООТ НПО ЦКТИ, 1997. — С. 60–64.
5. Свириденко И.И. Пассивная тепловая защита конечного поглотителя автономной СПОТ в период «ожидания» / И.И. Свириденко // Зб. наук. пр. СХУЯЕтаП. — Севастополь, 2008. — Вип. 1 (25). — С. 68–73.

Поступила в редакцию 20.10.2008 г.