

УДК 621.039.586

## **ОСОБЕННОСТИ ОТВОДА ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ТЕРМОСИФОННОЙ СПОТ В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОГО ПЕРВОГО КОНТУРА**

**И.И. Свириденко<sup>1</sup>, Д.В. Шевелев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Севастопольский национальный технический университет*

<sup>2</sup>*НТЦ НАЭК «Энергоатом», г. Севастополь*

Рассматривается запроектная авария реакторной установки АЭС с ВВЭР-1000 в условиях полного длительного обесточивания с потерей всех аварийных дизель-генераторов. Представлены результаты расчетного моделирования работы автономной термосифонной системы пассивного отвода остаточных тепловыделений (СПОТ) в условиях плотного первого контура. Приведено влияние автономной термосифонной СПОТ на продолжительность и характер аварийного процесса теплоотвода в условиях функционирования быстродействующей редуцирующей установки (БРУ-А) от аккумуляторной батареи.

### **Введение**

Статья является продолжением работ [1 - 5], посвященных расчетному моделированию процесса аварийного теплоотвода от реакторной установки (РУ) АЭС с ВВЭР-1000 автономной системой пассивного отвода остаточных тепловыделений (СПОТ) с теплообменниками аварийного расхолаживания (ТОАР) на основе низкотемпературных двухфазных термосифонов (ДТС) [6]. Главным отличием рассматриваемой СПОТ от известных проектов РУ с ВВЭР с пассивными системами безопасности (АЭС-91/99, АЭС-2006) является отвод остаточного тепловыделения от первого контура, а не от второго.

Выполнено расчетное моделирование, и приводится анализ процесса теплоотвода в условиях исходного события аварии (ИСА) – полного длительного обесточивания с потерей всех аварийных дизель-генераторов. Актуальность работы обусловлена сложностью организации аварийного теплоотвода в рассматриваемых условиях с полным обесточиванием. Примером подобного события является произошедшая 11 марта 2011 г. авария на АЭС «Фукусима Дайичи», где в результате потери основных и аварийных источников электроснабжения от воздействия цунами, вызванного землетрясением, был нарушен отвод остаточного тепловыделения от РУ и приреакторных бассейнов выдержки.

Предотвращение фукусимского сценария возможно только при наличии пассивных систем безопасности, снижающих температуру и давление в первом контуре за счет эффективного отвода остаточного тепловыделения. Функционирование СПОТ должно приводить РУ в безопасное состояние или обеспечивать оперативному персоналу значительный запас времени для предотвращения перехода запроектной аварии в тяжелую стадию.

### Постановка цели и задачи исследования

Целью работы является исследование особенностей отвода остаточного тепловыделения РУ с ВВЭР-1000 автономной термосифонной СПОТ при запроектной аварии с полным длительным обесточиванием и потерей всех аварийных дизель-генераторов в условиях плотного первого контура.

Для достижения поставленной цели разработана расчетная модель СПОТ с ДТС для РУ АЭС с ВВЭР-1000 и решается задача анализа условий, позволяющих осуществлять эффективный и долговременный отвод остаточного тепловыделения.

### Особенности моделируемого аварийного процесса

Расчетное моделирование переходного процесса проведено для условий запроектной аварии с полным длительным обесточиванием на модели РУ с ВВЭР-1000/В-320 энергоблока ХАЭС-1 с отказом всех аварийных дизель-генераторов и невозможностью подключения внешних источников электроснабжения. Единственным аварийным источником электроэнергии остается аккумуляторная батарея (АБ). Первый контур – плотный.

Схема автономной СПОТ, включающей четыре петли расхолаживания с термосифонными ТОАР и петлю системы пассивного расхолаживания компенсатора давления (КД), изображена на рис. 1. Конечным поглотителем служит вода в баке аварийного отвода теплоты (БАОТ). Подробное описание автономной СПОТ приведено нами в [1 - 5].

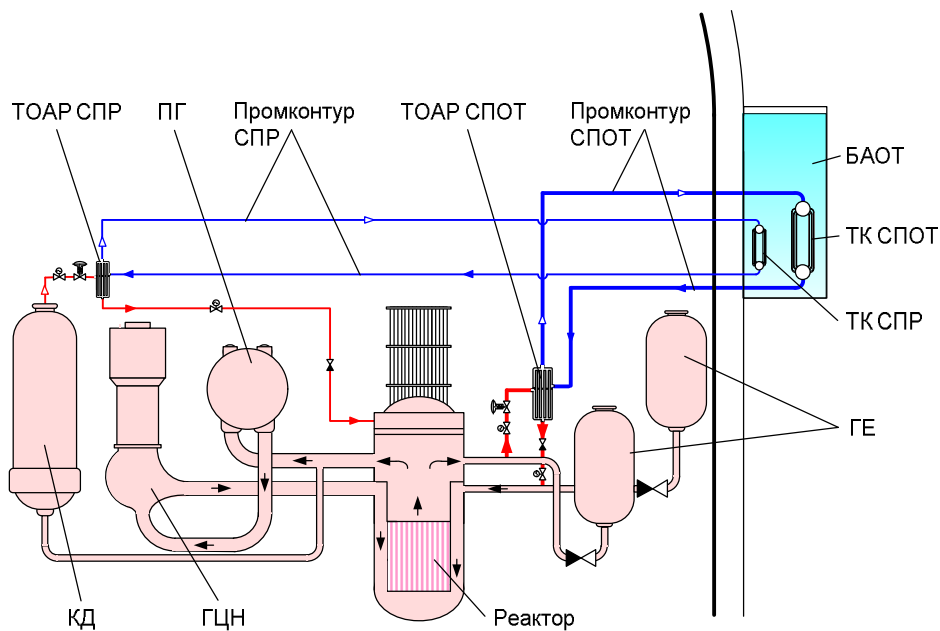


Рис. 1. Схема автономной СПОТ с термосифонными ТОАР для РУ с ВВЭР-1000

Моделирование выполнено с использованием расчетного теплогидравлического кода RELAP5/MOD3.4. При моделировании принято исходное состояние РУ, соответствующее ее работе в стационарном режиме на номинальной мощности. Топливная загрузка – стандартная для 4-годичной кампании, период эксплуатации – конец кампании. СПОТ находится в состоянии ожидания. Исходное состояние остальных элементов РУ соответствует регламенту нормальной эксплуатации РУ с ВВЭР-1000/В-320.

Потеря электроснабжения собственных нужд происходит на двадцатой секунде моделируемого процесса. Срабатывание аварийной защиты – по факту обесточивания. Активные системы безопасности, кроме запитанных от источников 1-й категории надежности (АБ), не работают в течение всего переходного процесса. Вся электроприводная арматура, включая регулирующие, запорные и паросбросные клапаны с электроприводом, с первой секунды переходного процесса неработоспособна, за исключением быстродействующей редуцирующей установки со сбросом пара в атмосферу (БРУ-А), которая в аварийных условиях с обесточиванием запитана от АБ.

Основной особенностью моделируемого процесса является плотный первый контур, что формирует повышенные требования к уровню отводимой тепловой мощности и надежности работы СПОТ. В предыдущих работах [1 - 5] нами рассматривались процессы аварийного отвода остаточных тепловыделений с наложением ИСА в виде малой некомпенсируемой течи первого контура. С одной стороны, СПОТ при течи теплоносителя функционирует в более «комфортных» условиях, чем при плотном первом контуре, так как часть тепловой энергии отводится из РУ с течью. С другой стороны, из-за течи, даже малой (эквивалентным диаметром Ду 20...32 мм), первый контур теряет теплоноситель, и компенсировать его потерю возможно, только используя пассивную часть системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ).

Другой особенностью является возможность отвода части теплоты от РУ с паром второго контура, сбрасываемым через БРУ-А в атмосферу. Ранее в [1 - 5] моделирование аварийного процесса выполнялось с учетом максимально консервативных условий, при которых на внешнее обесточивание и отказ аварийных источников переменного тока (аварийных дизель-генераторов) накладывался отказ АБ, при котором БРУ-А не работает.

БРУ-А в РУ с ВВЭР-1000 представляет собой электрифицированную паросбросную арматуру, расположенную на каждом из паропроводов острого пара в неотсекаемой части. Электроснабжение БРУ-А осуществляется от АБ в течение не менее одного часа после полной потери электроснабжения.

Алгоритм работы БРУ-А следующий. Исходное положение БРУ-А – полностью закрыта. Ввод БРУ-А в работу и их принудительное открытие осуществляется, когда давление в соответствующем паропроводе превысит 7,35 МПа. Если давление в паропроводах остается высоким, БРУ-А переходят в режим поддержания постоянного давления на уровне  $(7,0 \pm 0,2)$  МПа. Поддержание давления обеспечивается цифровым регулятором, осуществляющим необходимую степень его открытия. Если в процессе регулирования при минимальном открытии БРУ-А (менее 5 %) давление в паропроводе становится ниже 6,8 МПа, происходит ее полное закрытие и регулятор отключается. Максимальное время полного открытия/закрытия БРУ-А составляет 15 с.

В дальнейшем, при повторном росте давления до уставки принудительного открытия, цикл работы БРУ-А повторяется. После исчерпания заряда АБ БРУ-А остаются в фиксированном положении. Ниже будет показано количество теплоты, которое может быть отведено с паром, сбрасываемым из парогенератора в атмосферу, через БРУ-А.

Третьей особенностью моделируемого процесса является сравнительно ранний ввод в действие СПОТ – через 10 мин после срабатывания аварийной защиты, то есть на 620-й секунде. В [1 - 5] СПОТ подключалась на 2420-й секунде (40 мин после ИСА). Столь поздний момент подключения СПОТ предусматривал возможные задержки при открытии арматуры с пассивным принципом действия, но выбирался с учетом гарантированного недопущения открытия импульсно-предохранительного устройства (ИПУ) КД, так как в случае возможной его последующей «непосадки» начнется течь первого контура без возможности подпитки, что существенно усложнит протекание переходного процесса.

Более раннее начало функционирования СПОТ и СПР КД при аварии с обесточиванием имеет ряд преимуществ. Существенно сокращается продолжительность «участия» ПГ в отводе теплоты от РУ, что минимизирует потерю котловой воды из ПГ. Сохраненный при этом запас котловой воды в ПГ при расхолаживании РУ через СПОТ работает как «тепловой демпфер», ограничивая максимальную скорость расхолаживания на начальном этапе. Так как оголения трубочатки не происходит, нет роста перепада давления и температуры между контурами, что снижает риск межконтурных течей. В свою очередь, недопущение оголения трубочатки уменьшает риск появления в ней течи вследствие подачи холодной воды при включении аварийных питательных насосов после восстановления аварийного электроснабжения. И наконец, при раннем подключении СПОТ будет обеспечено автоматическое закрытие БРУ-А. Это произойдет в течение первого часа аварийного процесса, когда АБ еще не разряжены.

### Результаты расчетного моделирования

Расчетное время моделируемого переходного процесса ограничивалось либо достижением второго проектного предела повреждения топлива, либо переходом РУ в безопасное устойчивое состояние, при котором обеспечивается надежный теплоотвод от активной зоны.

После обесточивания (20-я секунда моделируемого процесса) срабатывает аварийная защита и происходит закрытие стопорных клапанов турбогенератора (СК ТГ). В результате давление в ПГ быстро растет (рис. 2).

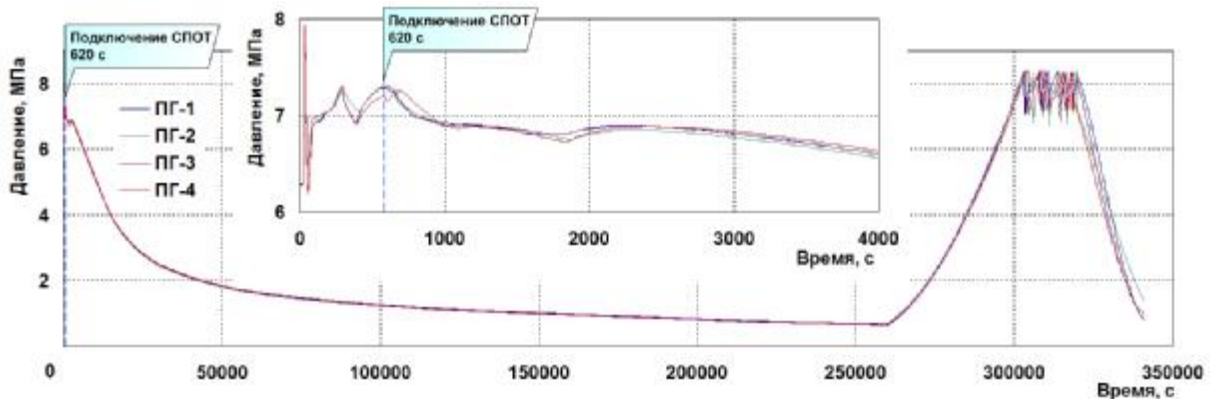


Рис. 2. Давление во втором контуре

Поскольку при полном обесточивании блока вводится запрет на работу быстродействующей редуцирующей установки со сбросом пара в конденсатор (БРУ-К), ограничение и регулирование давления в паропроводах осуществляется БРУ-А. В соответствии с описанным выше алгоритмом сразу после посадки СК ТГ происходит один цикл почти полного открытия/закрытия БРУ-А (рис. 3). При этом со сбросом пара в атмосферу от РУ отводится значительное количество теплоты (~ до 2800 МВт, рис. 4). То есть в начальный период после срабатывания аварийной защиты (с 20-й по 620-ю секунду) практически весь отвод теплоты осуществляется через ПГ (рис. 5).

Практически сразу после открытия БРУ-А происходит их закрытие. Это вызвано тем, что в силу инерционности ее приводов и снижения теплоотвода в ПГ из-за отключения главных циркуляционных насосов (ГЦН), снижения расхода теплоносителя через ПГ и теплоотвода в ПГ БРУ-А не успевают перейти в режим регулирования до того,

как давление в паропроводах снизится до уставки полного закрытия 6,8 МПа (10...40-й секунды после ИС аварии, см. рис. 2). В дальнейшем после установления естественной циркуляции (ЕЦ) первого контура в петлях и повторного роста давления в ПГ, БРУ-А снова приоткрываются (~250-я секунда после ИС аварии) и переходят в режим регулирования давления (см. рис. 3).

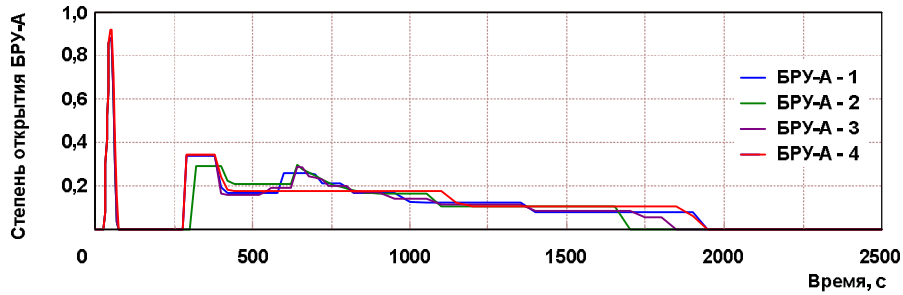


Рис. 3. Степень открытия БРУ-А

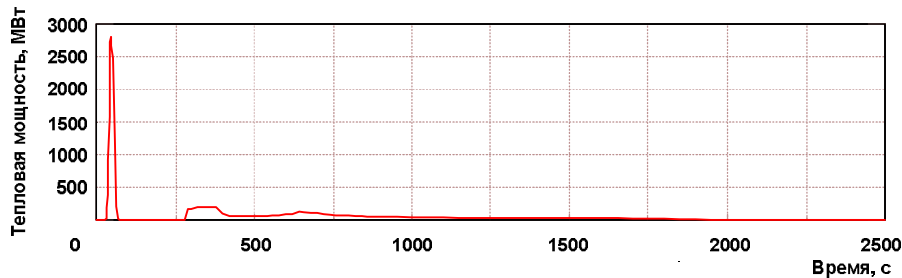


Рис. 4. Тепловая мощность, отводимая с паром через БРУ-А

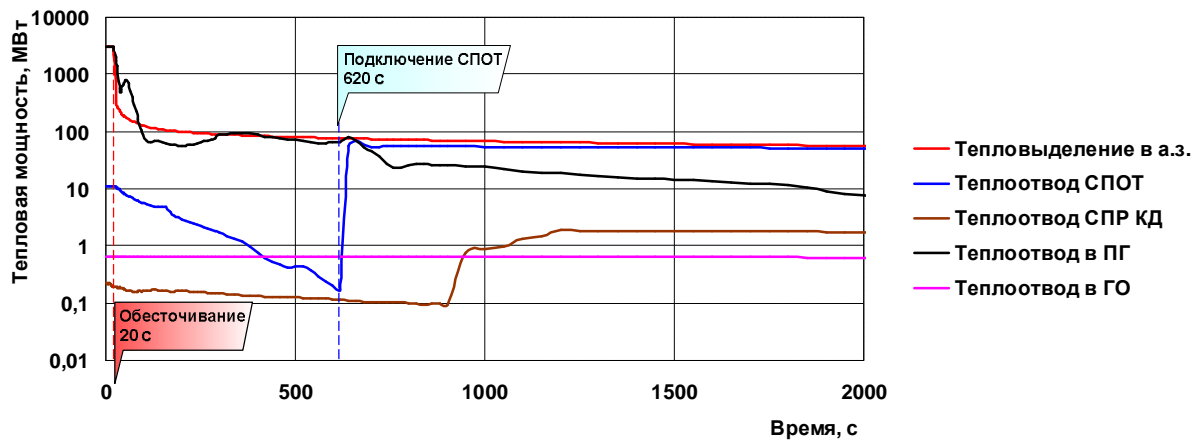


Рис. 5. Соотношение отводимой тепловой мощности основными элементами РУ после срабатывания аварийной защиты (ранний период аварии)

На 620-й секунде подключается СПОТ и основная часть теплоты отводится от реактора и первого контура уже через ТОАРы СПОТ и СПР КД (рис. 5, 6). По мере снижения температуры на выходе из реактора и в горячих линиях главного циркуляционного контура (ГЦК) снижается и теплоотвод в ПГ. Соответственно уменьшается степень открытия БРУ-А. На 1700...1900-й секундах процесса еще до исчерпания заряда АБ в соответствии с алгоритмом регулирования происходит полное и окончательное автоматическое закрытие всех четырех БРУ-А (см. рис. 3).

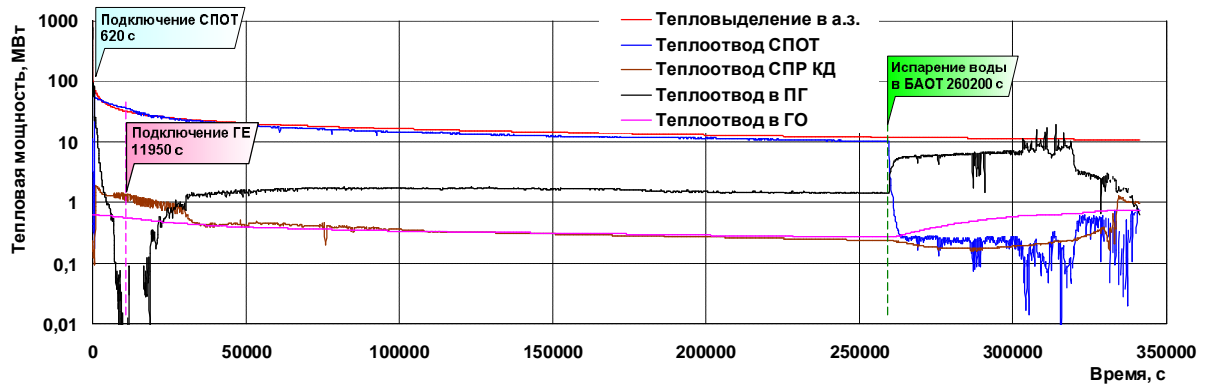


Рис. 6. Соотношение отводимой тепловой мощности СПОТ, СПР КД и ПГ после подключения СПОТ

СПОТ обеспечивает устойчивое расхолаживание РУ, о чем свидетельствует характер снижения температуры (рис. 7) и давления (рис. 8) первого контура, которые начинают снижаться практически сразу после подключения СПОТ. Уровень теплоотвода по всем четырем петлям СПОТ симметричный (рис. 9). Незначительные флуктуации в характере теплоотвода петель СПОТ объясняются вводом в контур «холодного» раствора борной кислоты из ГЕ САОЗ.

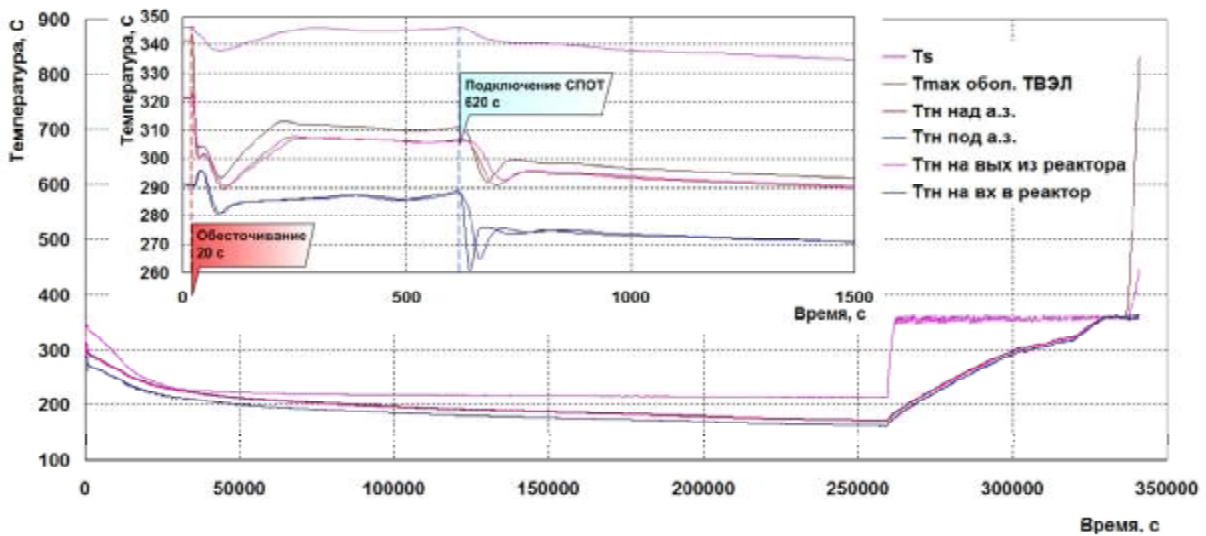


Рис. 7. Температура теплоносителя первого контура и максимальная температура оболочек ТВЭЛ

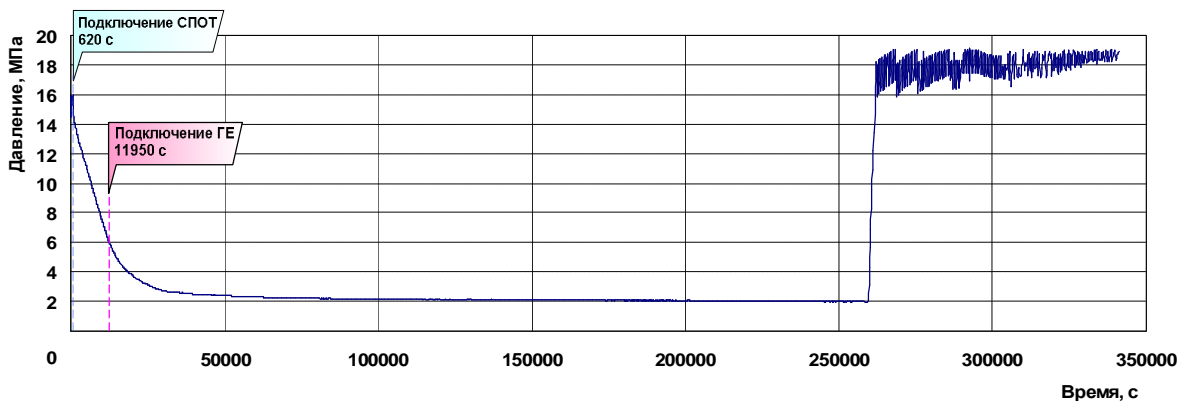


Рис. 8. Давление в первом контуре

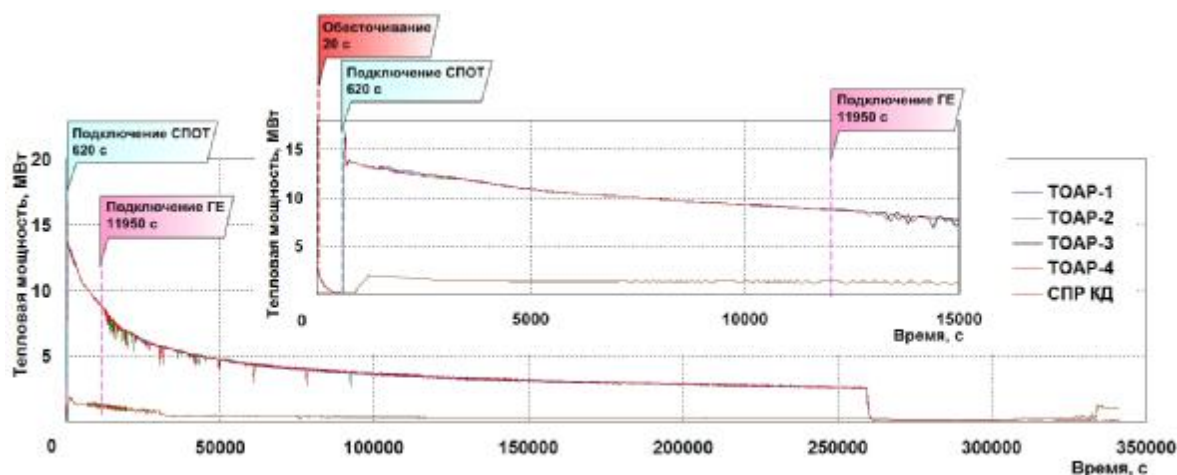


Рис. 9. Теплоотвод через термосифонные ТОАРы СПОТ и СПР КД

Также следует отметить, что потоком теплоносителя, циркулирующем через реактор, ГЦК и ТОАРы СПОТ, обеспечивается расхолаживание и парогенераторов. Это происходит практически до 30000...35000-й секунды переходного процесса, о чем свидетельствует снижение уровня котловой воды в ПГ (рис. 10).

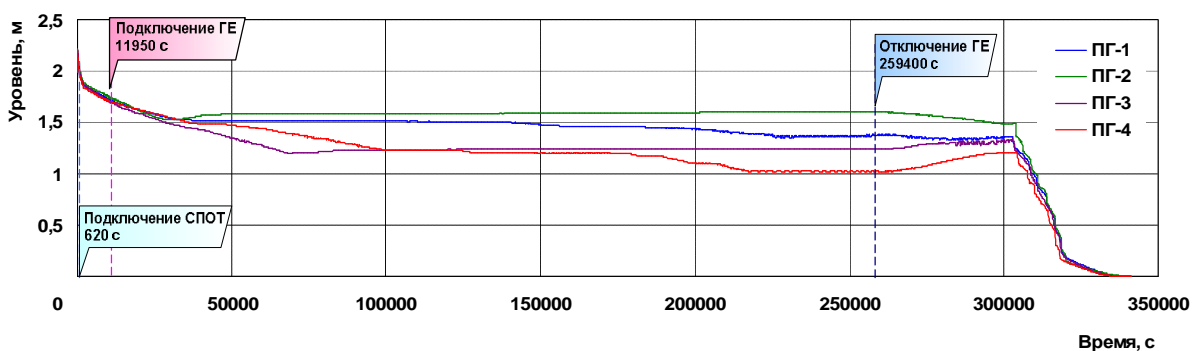


Рис. 10. Уровень котловой воды в ПГ

После ввода СПОТ в действие благодаря функционированию СПР КД происходит достаточно быстрое снижение давления первого контура до величины 3,0...2,5 МПа (см. рис. 8). Это обеспечивает сравнительно раннее подключение гидроемкостей (ГЕ) САОЗ. Уже на 11950-й секунде в первый контур начинает поступать раствор борной кислоты (рис. 11), что поддерживает глубоко подкритическое состояние активной зоны, быстро восстанавливает уровень в КД (рис. 12) и поддерживает неизменным максимальный уровень в реакторе на всем этапе переходного процесса (рис. 13).

Начиная с ~35000-й секунды и до окончания функционирования СПОТ темп изменения давления в первом контуре плавно понижается до 2,0 МПа, а на участке 200000...260000 с переходного процесса – практически не меняется. Это связано с тем, что практически весь первый контур, включая паровой объем КД, заполняется теплоносителем, поступающим из ГЕ САОЗ. Таким образом, давление в первом контуре на поздней фазе рассматриваемого процесса определяется остаточным давлением азота в ГЕ САОЗ.

Для оценки влияния СПОТ на развитие переходного процесса на рис. 7 вместе с температурой теплоносителя на входе и выходе в активную зону, а также на входе и выходе реактора, приведены графические зависимости изменения максимальной тем-

пературы оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) и температуры насыщения над активной зоной. Видно, что на всем этапе функционирования СПОТ сохраняется достаточный запас до кипения в активной зоне и поддерживается безопасное значение температуры оболочек ТВЭЛ.

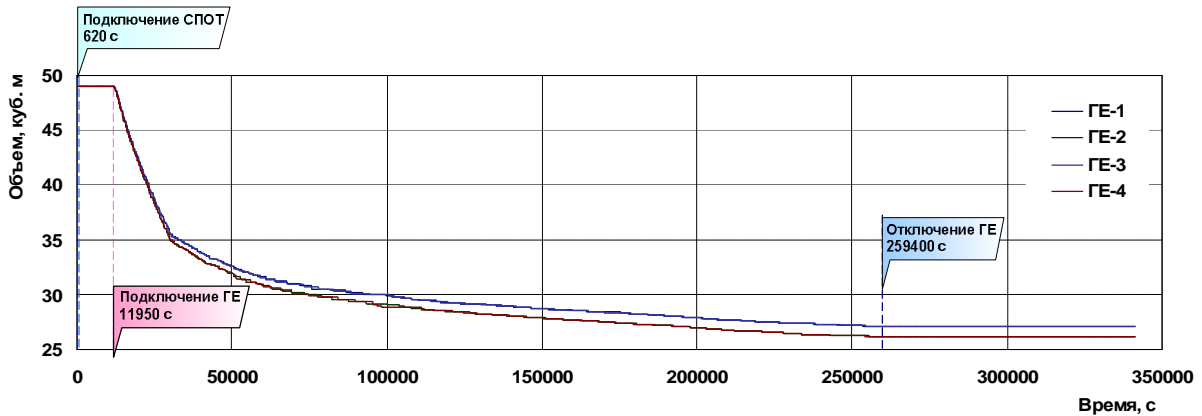


Рис. 11. Характер «срабатывания» ГЕ САОЗ

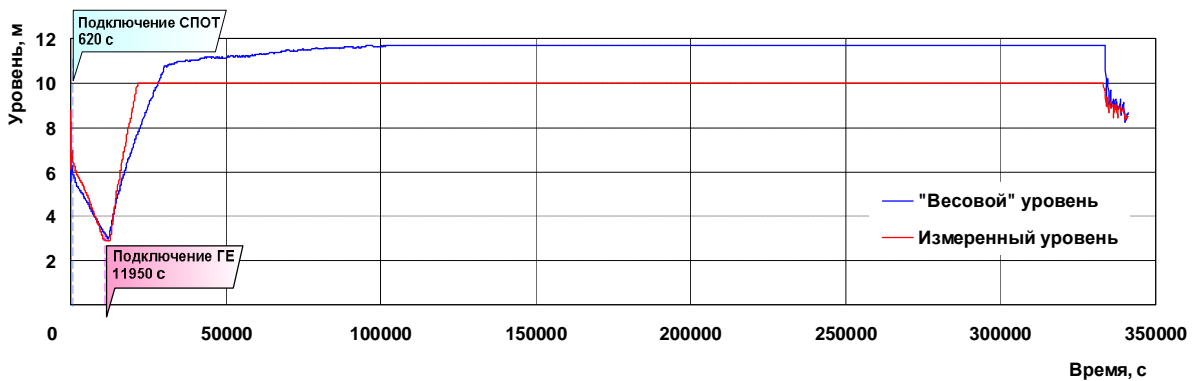


Рис. 12. Уровень теплоносителя в КД

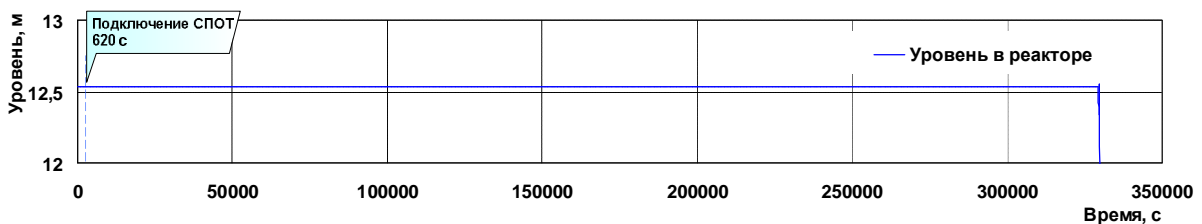


Рис. 13. Уровень теплоносителя в реакторе

Продолжительность поддержания РУ в безопасном состоянии определяется запасом конечного поглотителя – воды в БАОТ и запасом сохраненной котловой воды в ПГ. По мере отвода остаточного тепловыделения от РУ при функционировании СПОТ вода в БАОТ достигает насыщения, а затем постепенно испаряется (рис. 14). В рассматриваемой модели запас конечного поглотителя рассчитан на трое суток функционирования СПОТ и составляет 1600 т (4×400 т в каждом БАОТ).

В нашем случае полное осушение БАОТ происходит на 260200-й секунде. После исчерпания запаса конечного поглотителя эффективность СПОТ резко падает и отвод теплоты от РУ снова берет на себя ПГ (см. рис. 6). При этом безопасное состояние ак-



тивной зоны поддерживается вплоть до 340000-й секунды. В этот период наблюдается устойчивое повышение температуры и давления в первом контуре. Рост давления в первом контуре приводит к периодическому срабатыванию ИПУ КД с потерей части теплоносителя первого контура. Появляется уровень в КД и реакторе, затем начинается интенсивное кипение в активной зоне с последующим оголением и разогревом ТВЭЛ. Резкий рост температуры топлива наблюдается к окончанию четвертых суток аварийного процесса.

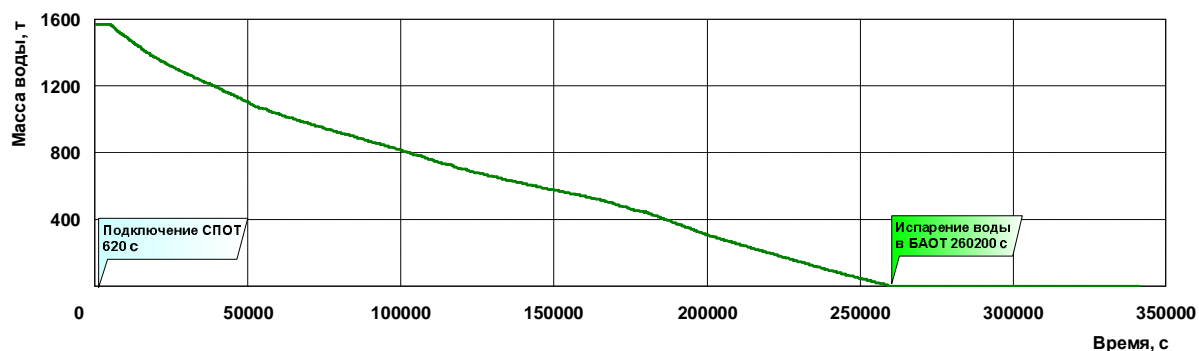


Рис. 14. Масса воды в БАОТ

Таким образом, при использовании автономной термосифонной СПОТ первого контура оперативный персонал располагает запасом времени, почти 4 суток для восстановления аварийного электроснабжения. Наличие мобильных источников электроэнергии или автономных дизель-насосов могут обеспечить подпитку БАОТ, что позволит продлить эффективное функционирование СПОТ и предотвратить переход аварии из запроектной в тяжелую фазу.

### Выводы

Представленные результаты расчетного моделирования аварийного режима отвода остаточного тепловыделения РУ с ВВЭР-1000 при полном длительном обесточивании в условиях плотного первого контура показывают, что автономная СПОТ на основе ДТС обеспечивает надежный и безопасный теплоотвод от активной зоны реактора в течение времени, которое определяется запасом конечного поглотителя – воды в БАОТ. Для принятой в расчете массы конечного поглотителя 1600 т это время составляет трое суток. Сохраненный запас котловой воды в ПГ позволяет продлить эффективный отвод остаточных тепловыделений от РУ практически еще на сутки.

Переходный процесс в условиях рассматриваемой ЗПА в течение всего рассмотренного периода времени не приводит к превышению пределов безопасной эксплуатации РУ. Следовательно, ремонтный персонал АЭС имеет достаточный запас времени для восстановления электроснабжения собственных нужд и проведения ремонтных мероприятий. Для продления времени аварийного теплоотвода автономной СПОТ запас воды в БАОТ должен быть пополнен.

Полученные результаты подтверждают правильность предлагаемой концепции повышения безопасности РУ АЭС с ВВЭР за счет формирования автономных термосифонных СПОТ первого контура, функционирование которых не зависит от работоспособности и состояния основного оборудования РУ.

## ОСОБЛИВОСТІ ВІДВЕДЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ АВТОНОМНОЮ ТЕРМОСИФОННОЮ СПВТ В УМОВАХ ЩІЛЬНОГО ПЕРШОГО КОНТУРУ

**І.І. Свириденко, Д.В. Шевельов**

Розглядається запроектна аварія реакторної установки АЕС з ВВЕР-1000 в умовах повного тривалого знеструмування із втратою всіх аварійних дизель-генераторів. Надано результати розрахункового моделювання роботи автономної термосифонної системи пасивного відведення залишкових тепловиділень (СПВТ) в умовах щільного першого контуру. Наведено вплив автономної термосифонної СПВТ на тривалість і характер аварійного процесу тепловідведення в умовах функціонування ШРП-А від акумуляторної батареї.

## FEATURES of AFTERHEAT REMOVAL by the AUTONOMOUS THERMOSIPHON SYSTEM under COMPACT PRIMARY COOLANT CIRCUIT CONDITIONS

**I. Sviridenko, D. Shevelev**

The out-designed failure of NPP' reactor plant with WWER-1000 under conditions of the complete prolonged de-energizing with the loss of all emergency diesel-generators was examined. The calculation modelling of the autonomous thermosiphon passive afterheat removal system (PHRS) operation under conditions of the compact primary coolant circuit was resulted. The influence of PHRS on the duration and character of emergency heat release process at the FRD-A operation from the storage battery was given.

### Список использованных источников

1. Свириденко И.И. Особенности аварийного процесса при малой некомпенсированной течи ВВЭР-1000 с использованием автономной СПОТ / И.И. Свириденко // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2007. – Вып. 3 (23). – С. 100 – 108.
2. Исследование и разработка высокоэффективных экобезопасных тепловых схем ядерных и тепловых энергоустановок («Контур». Направление – атомная энергетика). Компонировка, схемы и режимы работы автономных пассивных систем аварийного расхолаживания ЯЭУ: Отчет о НИР (заключит.). - Т. 3 / Севастоп. национ. технич. ун-т (СевНТУ); рук. К.Ю. Федоровский. – Севастополь, 2005. – 161 с. – № ГР 0103U001417. - Инв. № 0205U007159.
3. Свириденко И.И. Пассивное расхолаживание компенсатора давления ВВЭР-1000 автономным термосифонным контуром / И.И. Свириденко, Д.В. Шевелев // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Матер. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. – Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2009. – 9 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные (1069056 bytes). – Режим доступа: <http://www.gpress.podolsk.ru/publications/conferences/mntk2009/disc/documents/f024.pdf#search>.
4. Свириденко И.И. Аварийное расхолаживание реакторной установки АЭС с ВВЭР при полном длительном обесточивании энергоблока / И.И. Свириденко [и др.] // Вестник НТУУ (КПИ). Серия машиностроения. – 2002. – № 43. – С. 198 – 201.
5. Свириденко И.И. Расчетное моделирование аварийного расхолаживания ВВЭР-1000 автономной термосифонной СПОТ / И.И. Свириденко // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2006. – Вып. 17. – С. 29 – 41.
6. Пат. 81419 Україна, МПК<sup>8</sup> G21C15/18. Пасивна система відведення залишкових тепловиділень / Свириденко І.І.; заявник і патентовласник СевНТУ. – № а 200500392; заяв. 17.01.2005; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1.

Надійшла до редакції 03.06.2013 р.