

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ СПОТ ПРИ СРАВНЕНИИ ТЕПЛОТВОДА К ВОДЕ И К АТМОСФЕРНОМУ ВОЗДУХУ

И.И. Свириденко

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Рассмотрена схема и принцип действия автономной термосифонной системы пассивного отвода остаточного тепловыделения (СПОТ) от первого контура реакторной установки АЭС с ВВЭР в условиях запроектной аварии с полным длительным обесточиванием, потерей питательной воды и течами первого контура. Приведены особенности организации отвода остаточного тепловыделения РУ к воде или к атмосферному воздуху с помощью автономной термосифонной СПОТ. Представлены результаты расчетной оценки продолжительности эффективной работы автономной СПОТ при теплоотводе к воде и к атмосферному воздуху, при которой обеспечивается автономность реакторной установки и ее безопасное состояние. Результаты получены методом расчетного моделирования с использованием теплогидравлического кода RELAP5/MOD3.4. Дана сравнительная оценка полученных результатов. Проанализированы преимущества и недостатки использования воды и воздуха в качестве конечного поглотителя автономной термосифонной СПОТ.

Ключевые слова: АЭС с ВВЭР, безопасность, пассивный теплоотвод, конечный поглотитель, СПОТ, термосифонное теплообменное оборудование.

Введение

Основным методом повышения безопасности российских эволюционных реакторных установок (РУ) атомных электростанций (АЭС) с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) в условиях запроектной аварии (ЗПА) с полным длительным обесточиванием, потерей питательной воды и течами 1-го контура является применение системы пассивного отвода остаточного тепловыделения, осуществляющей отвод теплоты через парогенераторы (СПОТ ПГ). При этом теплоотвод конечному поглотителю обеспечивают внешние теплообменники-конденсаторы (ТК), расположенные за пределами гермообъема РУ.

В частности, отечественными проектами СПОТ ПГ предусмотрено два варианта отвода теплоты от ТК: к атмосферному воздуху – проекты Московского института «Атомэнергопроект» РУ с ВВЭР-1000/В-412 [1], АЭС-2006 с РУ ВВЭР-1200/В-392М и ВВЭР-ТОИ [2], а также к кипящей воде, размещенной в баках аварийного отвода теплоты (БАОТ), – проекты Санкт-Петербургского института «Атомэнергопроект» РУ с ВВЭР640/В-407 [3] и РУ с ВВЭР-1200/В-491 [4].

Аналогичные варианты внешнего теплоотвода рассматриваются и в разработке автономной СПОТ Севастопольского государственного университета, основной отличительной особенностью которой является организация отвода остаточного тепловыделения от 1-го контура, а не от 2-го [5]. Другой

отличительной особенностью этой системы является применение теплообменного оборудования на основе испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа – двухфазных термосифонов (ДТС), что существенно повышает надежность и безопасность аварийного теплоотвода.

Цель статьи – сравнительная оценка продолжительности эффективной работы автономной термосифонной СПОТ 1-го контура РУ АЭС с ВВЭР при организации внешнего теплоотвода к воде или к атмосферному воздуху, а также анализ преимуществ и недостатков обоих вариантов.

При исследовании режимов аварийного отвода остаточного тепловыделения РУ результатам оценки условий внешнего теплоотвода СПОТ уделяется повышенное внимание, так как функционирование именно внешнего теплообменника определяет эффективность работы всей системы. Необходимость обоснования выбора типа конечного поглотителя для РУ с ВВЭР с автономной термосифонной СПОТ определяет актуальность настоящей работы. Под термином «конечный поглотитель» здесь подразумевается среда, к которой осуществляется отвод теплоты от наружной поверхности ТК.

Схема и принцип действия автономной термосифонной СПОТ

Автономная СПОТ, предназначенная для отвода остаточного тепловыделения от 1-го контура

при ЗПА, включает две системы: систему пассивного отвода теплоты от реактора (СПОТ Р) и систему пассивного расхолаживания компенсатора давления (СПР КД) (рис. 1).

СПОТ Р осуществляет отвод остаточного тепловыделения активной зоны (а.з.) от теплоносителя 1-го контура, движение которого происходит за счет естественной циркуляции (ЕЦ) по тракту: реактор – теплообменник аварийного расхолаживания (ТОАР) – реактор. ТОАР СПОТ Р обеспечивает отвод теплоты от однофазного теплоносителя 1-го контура, либо от двухфазного – при кипении в а.з. В последнем случае ТОАР СПОТ Р функционирует как конденсатор пара 1-го контура [6].

СПР КД обеспечивает ускоренное снижение давления в 1-м контуре с целью своевременного подключения гидроемкостей (ГЕ) системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) для ввода раствора борной кислоты в а.з., что предотвращает выход реактора на повторную критичность. Циркуляция теплоносителя при расхолаживании КД организована по тракту: КД – ТОАР – реактор – КД. ТОАР КД играет роль конденсатора пара 1-го контура, отводимого из объема паровой подушки компенсатора.

СПОТ Р включает четыре независимых канала расхолаживания производительностью $4 \times 33,3$ %, СПР КД – два канала производительностью 2×100 %. В состав каждого из каналов входят: ТОАР на основе ДТС, двухфазный промконтур и ТК, расположенный за пределами гермообъема и обеспечивающий теплоотвод от промконтура к конечному поглотителю. ТОАР СПР КД функционируют параллельно с ТОАР СПОТ Р. Конструкции ТОАР и ТК для СПОТ Р и СПР одинаковы, отличаются лишь поверхностью теплообмена.

Теплообменную поверхность ТОАР СПОТ Р и ТОАР СПР КД формируют сборки ДТС [7], осуществляющие теплоперенос от 1-го контура к

промконтур. Трубопроводы промконтура выводятся за пределы гермообъема РУ. Пар промконтура поступает в ТК, где происходит его конденсация за счет теплоотвода к конечному поглотителю: непосредственно к атмосферному воздуху, либо при испарении воды в БАОТ. Конденсат возвращается в ТОАР, замыкая тракт циркуляции промконтура.

Помимо теплопереноса от теплоносителя 1-го контура к промконтур, ДТС выполняют функцию дополнительного барьера на пути вероятного распространения радиоактивных загрязнений за пределы гермообъема, что повышает безопасность РУ в условиях возможных межконтурных течей. При этом отвод остаточного тепловыделения автономной СПОТ от 1-го контура РУ обеспечивает ее независимость от функционирования 2-го контура и состояния парогенераторов.

Организация внешнего теплоотвода к атмосферному воздуху предусматривает размещение ТК в воздушных каналах за пределами гермообъема (ГО) аналогично [1, 2]. В воздушном канале формируются условия для естественной тяги охлаждающего воздуха. Теплообменную поверхность каждого из четырех ТК образуют 1200 вертикальных труб размером $(18 \times 1,5) \cdot 10^{-3}$ м с внешним оребрением (коэффициент оребрения $\gamma \sim 10$). Эффективная длина труб со стороны промконтура составляет 5,0 м. Движение пароводяной смеси промконтура в ТК – сверху вниз. Температура охлаждающего атмосферного воздуха на входе в канал принята равной $+45$ °С.

При теплоотводе к воде ТК размещаются в четырех БАОТ. ТК состоит из горизонтальных верхнего парового и нижнего конденсатного коллекторов Ду400 длиной по 5 м. Поверхность теплообмена одного ТК, составляющую 170 м², формируют 1200 вертикальных труб размером $(18 \times 1,5) \cdot 10^{-3}$ м и высотой 2,5 м. ТК расположен в

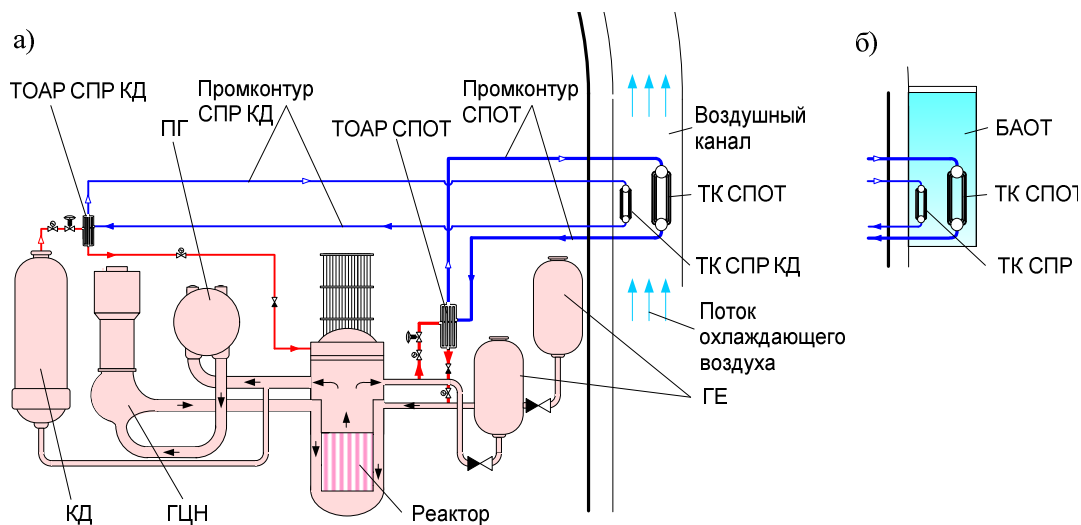


Рис. 1. Схема автономной СПОТ РУ с ВВЭР: а – с воздушным ТК; б – с водяным ТК (показан один канал СПОТ Р и один канал СПР КД)

нижней части БАОТ в специальной вертикальной выгородке, обеспечивающей при работе СПОТ формирование организованной естественной конвекции воды БАОТ вдоль теплообменных труб ТК. Начальная температура охлаждающей воды в БАОТ при подключении СПОТ к РУ принята равной +40 °С.

Материал стенки труб воздушного и водяного ТК – сталь 08Х18Н10Т. Полный теплоотвод от РУ обеспечивается тремя каналами СПОТ Р и одним каналом СПР КД.

Расчетные характеристики автономной термосифонной СПОТ с оценкой продолжительности ее эффективной работы

Оценка продолжительности эффективной работы автономной термосифонной СПОТ и сравнение полученных характеристик при теплоотводе к воде и к воздуху выполнена методом расчетного моделирования с использованием теплогидравлического кода RELAP5/MOD3.4 на модели РУ с ВВЭР-1000/В-320. Моделирование проведено для условий ЗПА с полным длительным обесточиванием, отказом всех аварийных дизель-генераторов и невозможностью подключения внешних источников электроснабжения.

Исходное состояние РУ и граничные условия ввода в действие СПОТ, принятые при моделировании, приведены в табл. 1 и 2, соответственно.

Исходное состояние остальных элементов РУ соответствует регламенту нормальной эксплуатации РУ с ВВЭР-1000/В-320.

На рис. 2–7 представлены полученные характеристики работы автономной СПОТ Р совместно

с СПР КД при сравнении использования воздуха и воды для теплоотвода от ТК.

После аварийного обесточивания РУ ограничение и регулирование давления в паропроводах 2-го контура осуществляется быстродействующей редуцирующей установкой со сбросом пара в атмосферу (БРУ-А), при этом от РУ отводится значительное количество теплоты (рис. 2). Таким образом, после срабатывания аварийной защиты на 20-й секунде в начальный период моделируемого процесса практически весь отвод теплоты осуществляется через ПГ.

Момент подключения СПОТ к РУ выбирался на основании предварительных расчетов из условия гарантированного недопущения открытия импульсно-предохранительного устройства (ИПУ) КД и соответствует 620-й секунде. С этого момента основная часть теплоты отводится уже через ТОАРы СПОТ Р. Соотношение отводимой тепловой мощности через СПОТ Р, СПР КД, ПГ и гермообъем (ГО) на всем этапе переходного процесса приведено на рис. 3.

СПОТ Р обеспечивает устойчивое расхолаживание РУ, о чем свидетельствует характер изменения температуры теплоносителя в а.з. (рис. 4) и давления 1-го контура (рис. 5), которые начинают снижаться практически сразу после подключения СПОТ Р. На всем этапе функционирования СПОТ Р сохраняется достаточный запас до кипения в а.з. и поддерживается безопасное значение температуры оболочек ТВЭЛ. Кроме того, СПОТ Р, помимо теплоотвода от а.з., обеспечивает расхолаживание и парогенераторов.

После ввода СПОТ в действие, благодаря одновременному расхолаживанию компенсатора

Исходное состояние РУ

Таблица 1

Характеристика	Состояние
Режим работы	Стационарный
Мощность РУ	Номинальная
Топливная загрузка	Стационарная для 4-годового топливного цикла
Период эксплуатации	Конец кампании
Состояние СПОТ	Режим ожидания

Граничные условия ввода в действие СПОТ

Таблица 2

Граничные условия	Значение
Потеря электроснабжения СН	20-я секунда
Срабатывание аварийной защиты	По факту обесточивания
Закрытие стопорных клапанов турбогенератора	После обесточивания
Активные системы безопасности, кроме запитанных от источников 1-й категории	Неработоспособны в течение всего переходного процесса
Регулирующие, запорные и паросбросные клапаны с электроприводами	Неработоспособны с 1-й секунды переходного процесса
БРУ-А	Запитана от аккумуляторной батареи
Ввод в действие СПОТ	Через 10 минут после обесточивания (620-я секунда)
Состояние каналов СПОТ	Работоспособны три из четырех

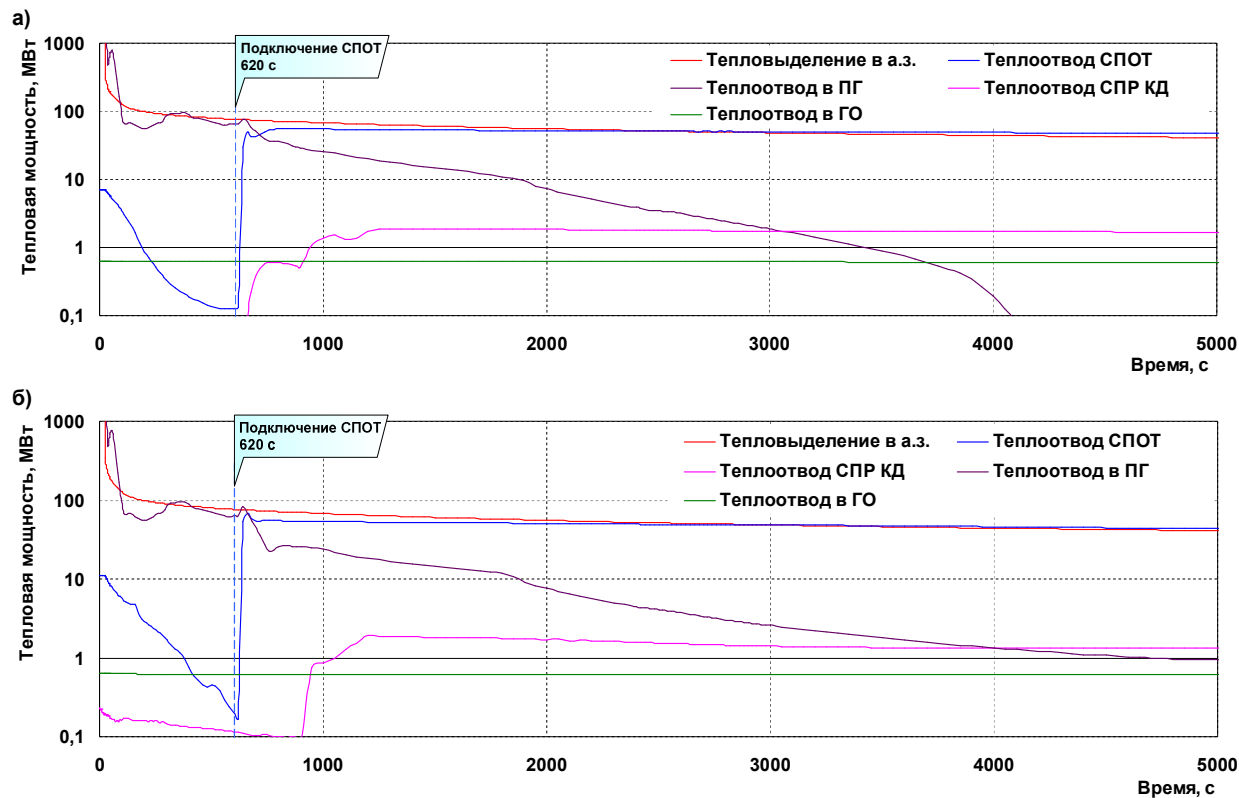


Рис. 2. Соотношение отводимой тепловой мощности СПОТ Р, СПР КД, ПГ и ГО на начальном этапе переходного процесса: а – с воздушным ТК; б – с водяным ТК

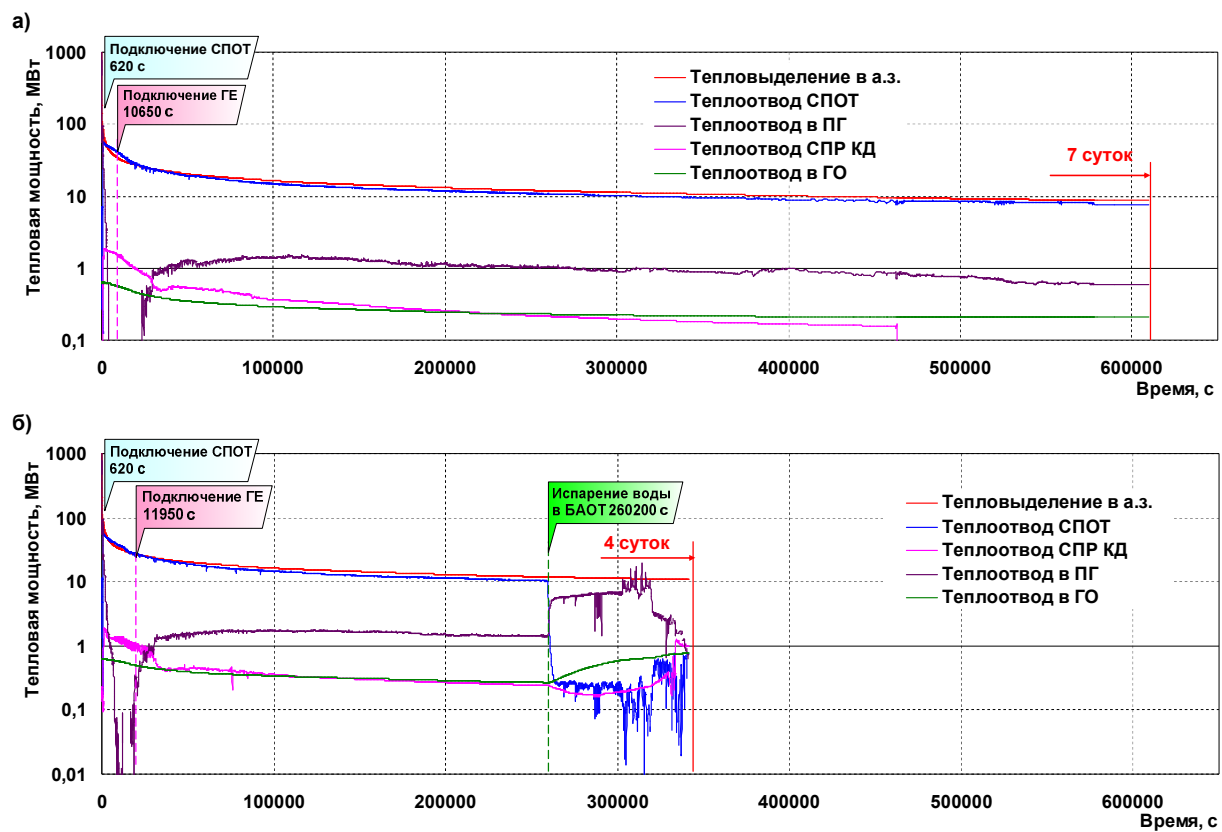


Рис. 3. Соотношение отводимой тепловой мощности СПОТ Р, СПР КД, ПГ и ГО на всем переходном процессе: а – с воздушным ТК; б – с водяным ТК

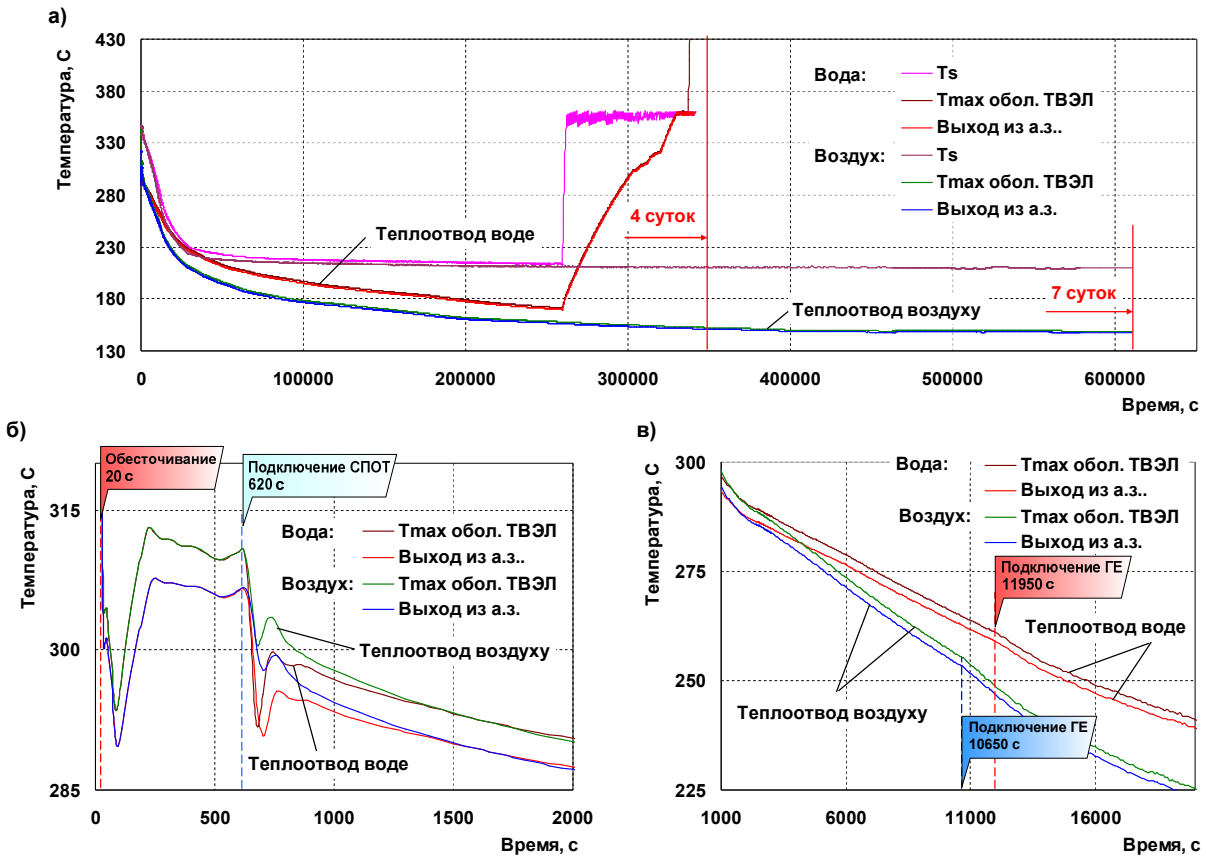


Рис. 4. Температура теплоносителя 1-го контура и максимальная температура оболочек ТВЭЛ: на всем переходном процессе (а); после срабатывания аварийной защиты и подключения СПОТ (б); до и после подключения ГЕ (в)

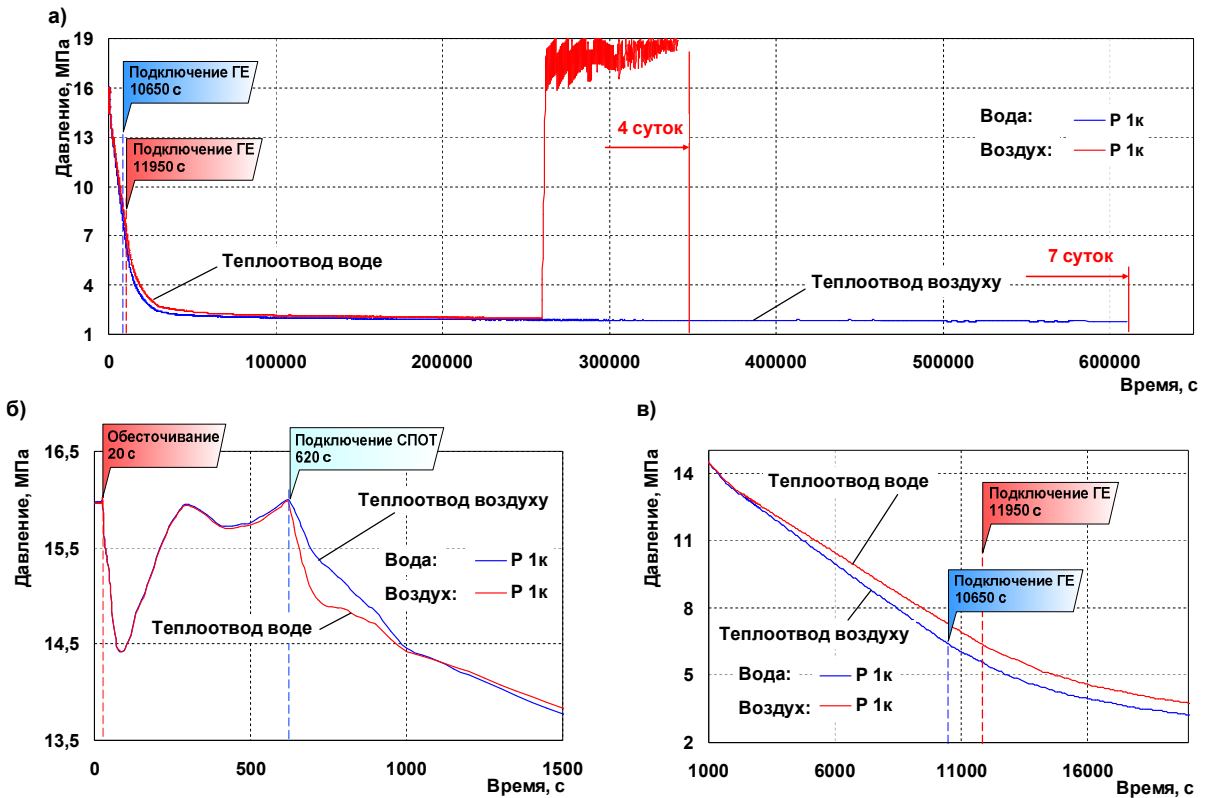


Рис. 5. Давление 1-го контура: на всем переходном процессе (а); после срабатывания аварийной защиты и подключения СПОТ (б); до и после подключения ГЕ (в)

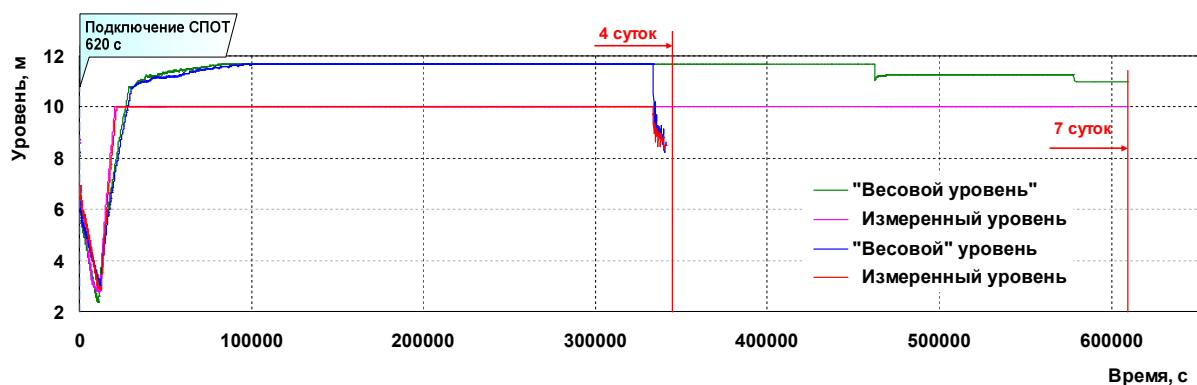


Рис. 6. Уровень теплоносителя в КД

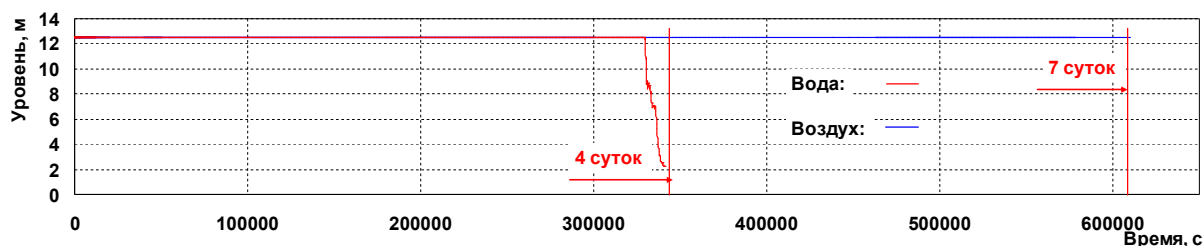


Рис. 7. Уровень теплоносителя в реакторе

с помощью СПР КД, происходит достаточно быстрое снижение давления 1-го контура. Это формирует условия для сравнительно раннего подключения ГЕ САОЗ: на 10 650-й секунде – для СПОТ с воздушным ТК и на 11 950-й секунде – с водяным (см. рис. 5).

В 1-й контур начинает поступать раствор борной кислоты, обеспечивая глубоко подкритическое состояние а.з. При этом быстро восстанавливается уровень в КД (рис. 6) и поддерживается неизменным максимальный уровень в реакторе на всем этапе переходного процесса.

После подключения ГЕ темп снижения давления в 1-м контуре становится более плавным и, примерно, со 100 000-й секунды, вплоть до окончания расчета, давление практически не меняется и поддерживается на уровне 2,0...1,8 МПа – для СПОТ с воздушным ТК, и 2,15...2,0 МПа – с водяным. Это связано с тем, что практически весь 1-й контур, включая паровой объем КД, заполняется теплоносителем, поступающим из ГЕ САОЗ. Таким образом, давление в 1-м контуре на поздней фазе переходного процесса, по сути, совпадает с остаточным давлением азота в ГЕ САОЗ в момент окончания срабатывания последних.

Расчетное время моделируемого переходного процесса для модели СПОТ с воздушным ТК составило 7 суток. За этот период уровень остаточного тепловыделения снижается до 7,53 МВт, то есть до значения, уже не оказывающего определяющего влияния на безопасность. Поэтому по окончании седьмых суток переходного процесса расчет был остановлен. Полученные расчетные характеристики состояния а.з. позволяют сделать

вывод о том, что продолжительность эффективной работы автономной СПОТ Р при теплоотводе к воздуху не ограничена.

Продолжительность поддержания РУ в безопасном состоянии для СПОТ с водяным ТК определяется запасом конечного поглотителя – воды в БАОТ и запасом сохраненной котловой воды в ПГ. В процессе работы СПОТ вода в БАОТ достигает состояния насыщения, а затем постепенно испаряется. В рассматриваемой модели запас воды в баках рассчитан на трое суток работы СПОТ Р и составляет 1600 т – по 400 т в каждом из четырех БАОТ. С учетом постулируемого дополнительного независимого отказа: невключения одного из каналов СПОТ, доступный объем воды в БАОТ – 1200 т.

Полное осушение БАОТ происходит на 260 200-й секунде, после чего эффективность СПОТ Р резко падает и отвод теплоты от РУ снова берет на себя ПГ (рис. 3, б). При этом безопасное состояние а.з. поддерживается вплоть до 340 000-й секунды. В этот период наблюдается устойчивое повышение температуры и давления в 1-м контуре, что приводит к периодическому срабатыванию ИПУ КД с потерей теплоносителя 1-го контура. Появляется уровень в КД (см. рис. 6) и в реакторе (рис. 7), затем возникает интенсивное кипение в а.з. с последующим оголением и разогревом ТВЭЛ (см. рис. 4, а). Значительный рост температуры топлива в расчёте начинается к окончанию четвертых суток аварийного процесса.

Таким образом, при принятом запасе воды в БАОТ оперативный персонал располагает запасом времени, почти 4 суток для восстановления ава-

рийного электроснабжения. Переходный процесс в условиях ЗПА с полным обесточиванием 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. В дальнейшем, если аварийное электроснабжение активных систем безопасности по каким-либо причинам восстановить не удалось, для предотвращения перехода аварии в тяжелую фазу необходима подпитка БАОТ. Для этого потребуются мобильные источники электроэнергии или автономные дизель-насосы.

Обсуждение полученных результатов

Результаты расчетного моделирования процесса отвода остаточного тепловыделения РУ с ВВЭР от 1-го контура с помощью автономной термосифонной СПОТ показывают преимущество воздушного охлаждения ТК по сравнению с водяным. Причем, характер полученных расчетных характеристик для СПОТ с воздушным и с водяным ТК практически одинаков. Отличия – только во временных интервалах.

Помимо основного преимущества: неограниченности по времени эффективного теплоотвода, СПОТ с воздушным ТК имеет более предпочтительные характеристики снижения параметров 1-го контура: температуры (см. рис. 4) и давления (см. рис. 5). При отводе теплоты к воздуху достигается гораздо больший температурный напор между теплоносителем 1-го контура и конечным поглотителем, что обеспечивает более эффективный теплоотвод от 1-го контура с соответствующим снижением его температуры и давления.

Это преимущество наблюдается практически на всем этапе переходного процесса, за исключением незначительного по продолжительности периода, сразу после ввода СПОТ в действие (см. рис. 4, б и 5, б). Здесь температурный напор при теплоотводе к воде превышает соответствующий показатель воздушного охлаждения, так как в этот период температура воды в БАОТ еще не достигла линии насыщения.

Воздух по сравнению с водой не нуждается в тепловой защите от замерзания. Простая схема его свободного движения реализуется за счет естественной тяги в канале с ТК. В тоже время при низкой температуре атмосферного воздуха для предотвращения замерзания конденсата в трубах ТК требуется постоянное подключение промконтура к РУ. Низкая интенсивность теплоотдачи к воздуху приводит к необходимости увеличения поверхности теплоотвода с помощью оребрения внешней поверхности ТК и обеспечения высокой скорости движения воздуха. Для этого используются тяговые участки большой протяженности, что существ-

венно увеличивает массу и габариты системы. Кроме того, в условиях высокой влажности атмосферного воздуха наружная поверхность ТК нуждается в надежной коррозионной защите.

Перечисленных недостатков лишена СПОТ с БАОТ. Большая теплопоглощающая способность воды при ее нагреве в БАОТ и последующем испарении, а также более высокие, по сравнению с воздушным ТК, коэффициенты теплопередачи, позволяют формировать простую, эффективную и компактную систему отвода теплоты от ТК. БАОТ не нуждается в протяженных тяговых участках, что упрощает конструкцию СПОТ, уменьшает ее массу и габариты. Практически не меняющаяся интенсивность теплоотдачи к кипящей в БАОТ воде и ее постоянная температура (100 °С) полностью исключают зависимость переходных характеристик от внешних условий теплоотвода.

Однако ограниченный запас воды в БАОТ и необходимость организации его пополнения в аварийных условиях полного длительного обесточивания энергоблока ставит все перечисленные преимущества использования воды на второе место после главного преимущества теплоотвода к воздуху – неограниченности его доступного объема.

Необходимо подчеркнуть, что сама организация отвода остаточного тепловыделения РУ с ВВЭР от активной зоны с помощью автономной термосифонной СПОТ обеспечивает преимущество по сравнению со СПОТ ПГ как при использовании воздуха, так и при использовании воды в качестве конечного поглотителя.

При воздушном охлаждении ТК преимуществом автономной СПОТ является то, что аварийный процесс не требует регулирования отводимой тепловой мощности. Отводимая термосифонными ТОАР тепловая мощность, с одной стороны, зависит от уровня остаточного тепловыделения в а.з., с другой – от интенсивности теплопереноса в промконтуре. Низкие параметры в промконтуре (пиковое давление ~ 0,4 МПа, установившееся ~ 0,12...0,1 МПа со снижением до 0,09...0,08 МПа), являются естественным ограничивающим фактором для теплоотвода к ТК, что в сочетании с относительно высоким термическим сопротивлением участка «1-й контур – испарители ДТС», исключает необходимость регулирования (ограничения) отводимой от РУ мощности.

Таким образом, в СПОТ Р интенсивность теплоотвода определяется и, одновременно, ограничивается участком «1-й контур – ДТС – промконтур». Условия же работы участка «промконтур – ТК – конечный поглотитель» практически не отличаются от условий работы схемы СПОТ ПГ, но без необходимости в регулировании теплоотвода.

При отводе теплоты от ТК запасенной в БАОТ воде основным преимуществом СПОТ Р является сохранение запаса теплоносителя 2-го контура. Это предотвращает оголение (даже час-

тичное) трубчатки ПГ в течение всего времени функционирования СПОТ Р. В условиях аварийного теплоотвода при невозможности своевременного пополнения БАОТ по истечении трех суток с момента обесточивания, сохраненный в ПГ запас котловой воды достаточен для эффективного теплоотвода от а.з. через 2-й контур с недопущением срабатывания ИПУ КД ещё, как минимум, в течение суток.

Общим преимуществом автономной СПОТ, независимо от типа конечного поглотителя, является то, что для ее функционирования достаточно сохранение лишь одной функции безопасности (ФБ): отвода теплоты по 1-му контуру, что обеспечивается запасом теплоносителя в реакторе, необходимым для теплоотвода от топлива и теплопереноса от теплоносителя в реакторе к промконтур СПОТ Р с наличием устойчивой циркуляции теплоносителя 1-го контура в петле СПОТ Р.

Для надежного функционирования СПОТ ПГ необходимо сохранение четырех ФБ:

1) отвода теплоты по 1-му контуру (теплоотвода от топлива в а.з.);

2) сохранение достаточного запаса теплоносителя 1-го контура (переноса теплоты в пределах 1-го контура от реактора к ПГ, что подразумевает отсутствие запаривания главных циркуляционных трубопроводов и образование гидрозатворов);

3) отвода теплоты по 2-му контуру (передачи теплоты в ПГ от 1-го контура к СПОТ ПГ, что требует наличия достаточного запаса котловой воды в ПГ);

4) управления давлением 2-го контура (для ввода в работу СПОТ ПГ). Причем, безопасный отвод остаточного тепловыделения с помощью СПОТ ПГ обеспечивается только совместным выполнением всех четырех ФБ.

Кроме того, после ввода автономной СПОТ в действие, благодаря одновременному расхолаживанию компенсатора с помощью СПР КД, формируются условия для более раннего срабатывания ГЕ САОЗ. Этим предотвращается ввод положительной реактивности при отводе остаточного тепловыделения автономной СПОТ Р. Подобный метод позволяет исключить необходимость увеличения эффективности органов регулирования системы управления и защиты, либо установки дополнительных систем, воздействующих на реактивность.

Выводы

1. Представленные результаты расчетной оценки режима аварийного отвода остаточного тепловыделения РУ с ВВЭР-1000 при ЗПА с полным длительным обесточиванием АЭС показали, что автономная термосифонная СПОТ обеспечивает эффективный, надежный и безопасный теплоотвод от а.з. реактора при использовании в качестве конечного поглотителя как воды, так и возду-

ха. Причем, полученные характеристики работы автономной СПОТ с воздушным и с водяным ТК имеют практически одинаковый характер.

2. Продолжительность эффективной работы автономной СПОТ зависит от поддержания условий достаточного отвода теплоты от внешней поверхности ТК, и при организации теплоотвода к воде и к атмосферному воздуху различна. В отличие от использования воды для отвода теплоты от ТК, где продолжительность времени, в течение которого обеспечивается надежное расхолаживание РУ, определяется запасом воды в БАОТ, использование атмосферного воздуха создает условия практически неограниченного по времени эффективного внешнего теплоотвода. Указанное обстоятельство является основным при выборе типа конечного поглотителя для автономной СПОТ, осуществляющей отвод теплоты от 1-го контура.

3. При сравнении массогабаритных показателей систем теплоотвода преимущество имеет водяное охлаждение СПОТ. В этом случае необходимо предусмотреть наличие системы тепловой защиты БАОТ в зимний период, а также возможность использования в аварийных условиях мобильных источников электроэнергии или автономных дизель-насосов для пополнения баков водой.

Литература

1. Особенности проекта АЭС нового поколения с реактором ВВЭР-1000 повышенной безопасности / В.М. Беркович, И.И. Копытов, Г.С. Таранов, М.Б. Мальцев // Теплоэнергетика. – 2005. – № 1. – С. 9–15.

2. Свириденко, И.И. Особенности организации аварийного отвода теплоты от СПОТ ПГ реакторной установки АЭС с ВВЭР / И.И. Свириденко // Энергетические установки и технологии. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 32–40.

3. Методические особенности обоснования пассивных систем безопасности АЭС с ВВЭР-640 / А.М. Афров [и др.] // Процессы теплообмена и гидродинамики в системах безопасности АЭС с ВВЭР-640: сб. тр. – СПб: АООТ НПО ЦКТИ. – 1997. – С. 12–22.

4. Совершенствование системы пассивного отвода тепла через парогенераторы на реакторной установке с ВВЭР-1200 в свете событий на АЭС «Фукусима» / В.В. Безлепкин [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф. – Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2013. – <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/article167-ru.htm> (дата обращения: 01.10.2013).

5. Passive Residual Heat Removal System for WWER with the Thermosiphon Heatexchange Equipment / I.I. Sviridenko, D.V. Shevelyov, O.V. Polyakov et al. // Int. J. Energy for a Clean Environment. – 2015. – Vol. 16, iss. 1–4. – P. 209–223. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2015015683

6. Пат. 81419 Украина, МПК⁸ G21C15/18. Пассивная система отвода остаточных тепло-выделений / И.И. Свириденко; заявитель и патентообладатель СевНТУ. – № а 200500392; заявл. 17.01.2005; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1. – 5 с.

7. Свириденко, И.И. Термосифонный теплообменник СПОТ первого контура ВВЭР-1000 / И.И. Свириденко, А.К. Сухов, Д.В. Шевелев, А.В. Поляков // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – 2013. – Вып. 1 (45). – С. 54–67.

Свириденко Игорь Иванович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Энергоустановки морских судов и сооружений» института Кораблестроения и морского транспорта, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь; i.sviridenko@mail.ru.

Поступила в редакцию 31 августа 2016 г.

DOI: 10.14529/power160301

ESTIMATED DURATION OF EFFECTIVE OPERATION OF AUTONOMOUS PASSIVE RESIDUAL HEAT REMOVAL SYSTEM (PRHRS) AT COMPARING HEAT REMOVAL TO COOLING WATER VS AMBIENT AIR

I.I. Sviridenko, i.sviridenko@mail.ru

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The article presents the layout and operation principles of an autonomous thermosiphon-based passive residual heat removal system (PRHRS) from the primary circuit of the nuclear power plant with VVER reactor under beyond-design accident conditions with complete long-term blackout, loss of feed water and primary LOCAs. Peculiarities of residual heat removal to water or ambient air by autonomous thermosiphon PRHRS are presented. The results of the analytical evaluation and estimated duration of effective operation of the autonomous PRHRS removing residual heat to water and air and providing a safe stable reactor condition are shown. The results were received based on numerical simulation using RELAP5 / MOD3.4 thermal-hydraulic code. The comparative evaluation of the results is made. The advantages and disadvantages of the use of water vs air as the final heat absorber are analyzed.

Keywords: nuclear power plants with VVER, safety, passive heatsink, final heat absorber, PRHRS, thermosiphon heat transfer equipment.

References

1. Berkovich V.M., Kopytov I.I., Taranov G.S., and Mal'tsev M.B. Salient Features of Design for New Generation Nuclear Power Station Equipped with Improved Safety VVER-1000 Reactor. *Thermal Engineering*, 2005, no. 1, pp. 9–16.
2. Sviridenko I.I. [Use of Ambient Water and Air as Final Heat Repository for PRHRS SG of WWER Power Units]. *Jenergeticheskie ustanovki i tehnologii* [Power Plants and Technologies], 2016, vol. 2, no. 2, pp. 32–40. (in Russ.)
3. Afrov A.M., et al. Metodicheskie osobennosti obosnovaniya passivnyh sistem bezopasnosti AJeS s VVJeR-640. Processy teplomassoobmena i gidrodinamiki v sistemah bezopasnosti AJeS s VVJeR-640 [Methodical Specifics of Substantiation of PP Passive Safety Systems with VVER-640: Proceedings]: sb. trudov. – SPb: AOOT NPO CKTI, 1997, pp. 12–22. (in Russ.)
4. Bezlepkin V.V. Semashko S.E. Alekseev S.B. Vardanidze T.G. Petrov Yu.Yu. [Improvement of Passive Heat Removal System through Steam Generators (SG PHRS) at NPP with VVER-1200 in Context of Fukushima Accident]. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/article167-ru.htm> (accessed 01.10.2013).
5. Sviridenko I.I., Shevelyov D.V., Polyakov O.V., Timofeev V.A., Sviridenko N.N. Passive Residual Heat Removal System for WWER with the Thermosiphon Heatexchange Equipment, *Int. J. Energy for a Clean Environment*, 2015, vol. 16, iss. 1–4, pp. 209–223. DOI: 10.1615/InterJenerCleanEnv.2015015683

6. Sviridenko I.I. *Passivnaja sistema otvoda ostatochnyh teplovydelenij* [Passive Residual Heat Removal System] Ukraine Patent 81419, no. a200500392; decl. 17.01.2005; publ. 10.01.2008, Bul. no. 1. 5 p.

7. Sviridenko I.I., Sukhov A.K., Shevielov D.V., Polyakov A.V. [Thermosiphon Based Heat Exchanger of WWER 1000 Primary Circuit Passive Residual Heat Removal System]. *Zbirnik naukovih prac' SNUJaEtaP* [Coll. Sci. Works SNUNEI], 2013, no. 1(45), pp. 54–67. (in Russ.)

Received 31 August 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Свириденко, И.И. Расчетная оценка продолжительности эффективной работы автономной СПОТ при сравнении теплоотвода к воде и к атмосферному воздуху / И.И. Свириденко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 5–14. DOI: 10.14529/power160301

FOR CITATION

Sviridenko I.I. Estimated Duration of Effective Operation of Autonomous Passive Residual Heat Removal System (PRHRS) at Comparing Heat Removal to Cooling Water vs Ambient Air. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 5–14. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160301