

ВЛИЯНИЕ КОМПОНОВКИ СПОТ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ОТВОДА ОСТАТОЧНЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ ПРИ ВЫБРОСЕ АЗОТА В ПЕРВЫЙ КОНТУР

И.И. Свириденко, Д.В. Шевельов, А.В. Поляков. **Вплив компонування СПВТ на безпеку відводу залишкових тепловиділень за умов викиду азоту в перший контур.** Наведено аналіз впливу компонування автономної термосифонної системи пасивного відводу залишкових тепловиділень на безпеку реакторної установки АЕС с ВВЕР-1000 при запроектній аварії зі знеструмуванням за умов накладення малої некомпенсованої течії теплоносія та викиду азоту з гідроємностей в перший контур.

И.И. Свириденко, Д.В. Шевелев, А.В. Поляков. **Влияние компоновки СПОТ на безопасность отвода остаточных тепловыделений при выбросе азота в первый контур.** Приведен анализ влияния компоновки автономной термосифонной системы пассивного отвода остаточных тепловыделений на безопасность реакторной установки АЭС с ВВЭР-1000 при запроектной аварии с обесточиванием в условиях наложения малої некомпенсированной течи теплоносителя и выброса азота из гидроемкостей в первый контур.

I.I. Sviridenko, D.V. Shevelev, A.V. Polyakov. **Influence of the PRHR system configuration on the afterheat cooling safety when nitrogen is ejected into the primary coolant circuit.** Analysis of the independent thermosiphon passive heat decay removal system configuration influence on the WWER-1000 nuclear reactor plant safety at non-design accident with de-energization, small noncompensible coolant leakage, as well as when nitrogen is being ejected from accumulators into the primary coolant circuit, has been carried out.

При аварийном отводе остаточных тепловыделений реакторной установки (РУ) АЭС с ВВЭР-1000 в условиях запроектной аварии с полным длительным обесточиванием возможна потеря всех аварийных источников электроснабжения собственных нужд. Это приведет к зависимому отказу на закрытие электроприводной отсечной арматуры на линии впрыска из гидроемкостей (ГЕ) системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) ядерного реактора. После исчерпания в них запаса раствора борной кислоты произойдет выброс азота из ГЕ в первый контур, что существенно ограничит теплоотвод через второй.

Влияние попадания азота в первый контур на условия теплоотвода через парогенератор (ПГ) исследовано для РУ с ВВЭР-440 [1] и ВВЭР-1000 [2, 3]. Результаты исследований показывают, что, если все количество газообразного азота будет заперто в ПГ, он полностью блокирует теплообмен между первым и вторым контурами. В случае малої течи теплоносителя данное обстоятельство помешает эффективному расхолаживанию активной зоны.

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования системы пассивного отвода остаточных тепловыделений (СПОТ) для проекта РУ нового поколения АЭС-2006 с ВВЭР-1000 продемонстрировали, что в условиях использования ПГ как основного теплообменника отвода теплоты наличие неконденсирующихся газов в паре первого контура приводит к значительному снижению конденсационной мощности ПГ и ухудшению условий теплоотвода от активной зоны [3]. Экспериментально доказано, что лишь отвод парогазовой смеси с расходом, соответствующим расходу первой ступени системы ГЕ-2, позволяет сохранить необходимую конденсационную мощность ПГ, достаточную для поддержания эффективного теплоотвода от РУ. Однако организация линии сдвухки требует управления ее арматурой, что снижает степень пассивности и надежность предлагаемой СПОТ ПГ.

Предлагается анализ влияния проникновения азота в первый контур на безопасность отвода остаточных тепловыделений РУ АЭС с ВВЭР-1000 автономной СПОТ с использованием термосифонного теплообменного оборудования [4]. СПОТ состоит из четырех независимых каналов расхолаживания, каждый из которых включает конвективную петлю 1 с естественной циркуляцией (ЕЦ) теплоносителя первого контура, теплообменник аварийного расхолаживания (ТОАР) 2 со сборкой ординарных двухфазных термосифонов (ДТС), двухфазный промежуточный контур расхолаживания 3, выходящий из объема контейнента за пределы защитной оболочки и

соединяющий ТОАР 2 с расположенным в баке 4 аварийного отвода теплоты, заполненном конечным поглотителем — водой, теплообменником-конденсатором (ТК) 5 (рис. 1).

Особенностью предлагаемой СПОТ является наличие дополнительного термосифонного теплообменника 6, отвод теплоты от которого осуществляется пассивным образом через двухфазный промконтур 7 и теплообменник-конденсатор 8 в воде бака 4. Теплообменник 6 обеспечивает эффективное расхолаживание компенсатора давления (КД) 9 и соответствующее снижение давления в первом контуре для своевременной и надежной подачи жидкого поглотителя — раствора борной кислоты из штатных гидроемкостей (ГЕ) 11 пассивной части САОЗ. Петля расхолаживания 1 подсоединена к верхнему 12 и нижнему 13 трубопроводам САОЗ. ТОАР 2 трубопроводом подключен гидроемкостям (ГЕ) 11. Расположение термосифонного ТОАР 2 на одном уровне с ПГ 10 обусловлено стремлением увеличить движущий напор ЕЦ первого контура в петле 1 СПОТ (рис. 1, а). Однако при такой компоновке ТОАР 2 оказывается в верхней точке петли расхолаживания 1 на высоте $h=5$ м относительно горячего трубопровода 14 главного циркуляционного контура (ГЦК). Такое расположение ТОАР 2 в условиях проникновения азота в первый контур будет способствовать образованию “пробок” неконденсирующегося газа в верхней части ТОАР 2 и в трубопроводе, подводящем к нему горячий теплоноситель из реактора 15.

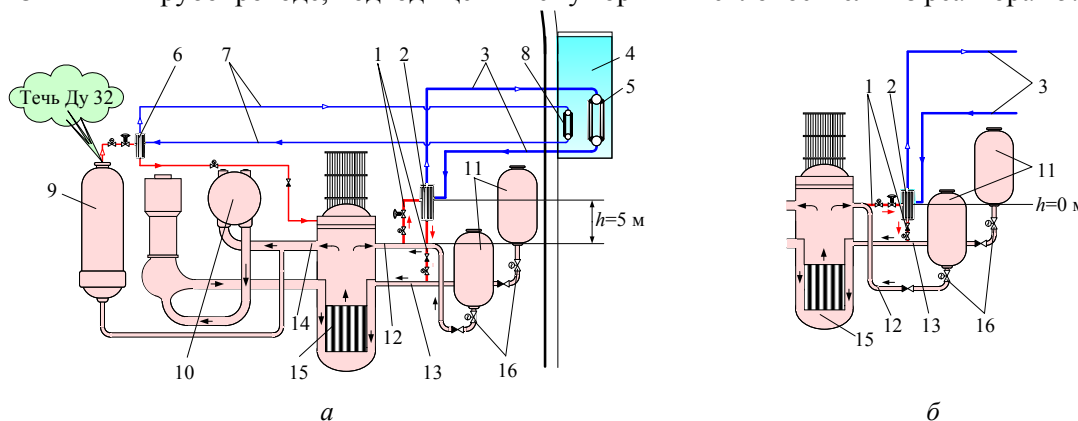


Рис. 1. Варианты компоновки автономной СПОТ с расположением ТОАР на высоте 5 м — вариант “5 м” (а) и 0 м — вариант “0 м” (б) от верхнего трубопровода САОЗ

Данное обстоятельство в аварийной ситуации приведет к снижению эффективности теплоотвода от активной зоны реактора 15. Организация принудительного газоудаления из ТОАР 2 проблематична, т.к. потребует наличия управляемой арматуры на линии сдувки. Более эффективным методом предотвращения потери теплоотвода из-за газовой “пробки” в петле расхолаживания является размещение ТОАР 2 на уровне верхнего трубопровода 12 САОЗ (вариант “0 м”) (рис. 1, б). ТОАР 2 должен быть расположен таким образом, чтобы его трубная решетка находилась на уровне верхней образующей трубопровода 12 САОЗ. В этом случае проникающий в первый контур газ не будет скапливаться в петле расхолаживания 1 СПОТ, а в условиях даже слабой ЕЦ будет перемещаться в объемы ГЦК 14, расположенные выше ТОАР 2: в ПГ 10 и в КД 9.

Для оценки влияния компоновки СПОТ на безопасность отвода остаточных тепловыделений проведено расчетное моделирование аварийного процесса с использованием теплогидравлического кода RELAP5/MOD3.2. Расчет выполнен для схемы РУ с ВВЭР-1000/В-320. Начальные условия: течь эквивалентным диаметром 32 мм из парового объема КД (в месте подключения патрубка аварийного газоудаления), образующаяся на 20-й секунде процесса, с наложением обесточивания на 100-й секунде, подключение СПОТ — на 2520-й. Момент подключения СПОТ выбран из условия гарантированного недопущения открытия импульсно-предохранительного устройства КД.

По окончании срабатывания ГЕ 11 закрытия их отсечных арматур 16 не происходит. Для оценки влияния азота на теплоотвод СПОТ выполнен вариантный расчет с проектной отсечкой ГЕ САОЗ после исчерпания в них запаса раствора борной кислоты.

Расчетное время моделируемого процесса с попаданием азота в первый контур $\tau = 120000 \dots 140000$ с (около 1,5 сут.), а в варианте без попадания азота — 236000 с (2,7 сут.). Примерно, через 2400 с после обесточивания к процессу отвода остаточных тепловыделений РУ подключается автономная СПОТ. За счет интенсивного расхолаживания давление P в первом

контуре снижается и после 5000 с достигает уровня 6,0 МПа, обеспечивая подключение ГЕ и подпитку первого контура раствором борной кислоты, аналогичен и характер снижения температуры оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) (рис. 2, а, б, соответственно).

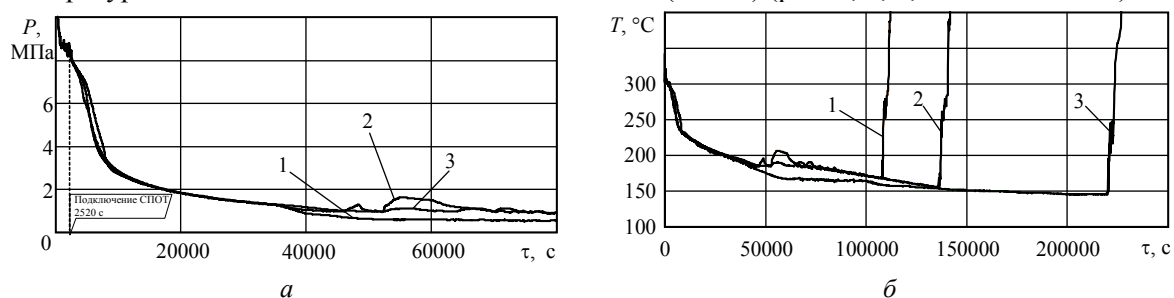


Рис. 2. Изменение параметров РУ: давления первого контура (а); температуры оболочек ТВЭЛ (б); компоновка автономной СПОТ с расположением ТОАР на высоте 5 м без азота (1), 5 м с азотом (2), 0 м с азотом (3)

Запас раствора борной кислоты в ГЕ САОЗ достигает минимально допустимого значения за 37000...39000 с после начала аварии. Если затем отсечная арматура 16 закрывается, то попадания азота в первый контур не происходит, и эффективный теплоотвод автономной СПОТ сохраняется даже после запаривания патрубков реактора 15 с продолжением функционирования СПОТ на пароводяной смеси. В результате уровень кипящего теплоносителя в реакторе снижается медленно, чему также способствует и постоянное снижение уровня остаточных энерговыделений. Поэтому разогрев топлива начинается только по истечении 220000 с (2 сут. 13 ч) с момента аварии, а повреждение активной зоны — после 236400 с (2 сут. 17 ч) (см. рисунок. 2, б, соответственно).

При аварийном отключении источников электроэнергии отсечная арматура 16 на линии впрыска из ГЕ 11 остается в открытом состоянии, в результате чего происходит полное опорожнение ГЕ 11 и азот попадает в первый контур РУ. При этом наблюдается периодическое ухудшение условий теплоотвода через ТОАР 2, что обусловлено совместным влиянием двух факторов: сокращением эффективной теплообменной поверхности ТОАР по первому контуру из-за роста в нем объемного содержания азота и частичным блокированием азотом расхода теплоносителя в соединительных трубопроводах ТОАР 2. В результате, примерно после 45000 с возрастают температура оболочек ТВЭЛ, давление в первом контуре и расход теплоносителя в течь.

При расположении ТОАР 2 на одном уровне с ПГ 10, т.е. при расположении трубной решетки ТОАР на высоте $h=5$ м от верхней образующей верхнего трубопровода 12 САОЗ (вариант “5 м”), после попадания азота в первый контур наблюдается более ранний разогрев активной зоны — на 108300 с (1 сут. 6 ч) после начала аварии, а повреждение зоны — на 120000 с (1 сут. 9 ч) Полученные временные интервалы хоть и на порядок больше, чем в варианте РУ без СПОТ, тем не менее, почти вдвое меньше, чем в варианте без аварийного попадания азота в контур.

Расположение ТОАР 2 на уровне верхней образующей верхнего трубопровода 12 САОЗ (вариант “0 м”), хотя и снижает движущий напор ЕЦ, но не оказывает существенного отрицательного влияния на эффективность теплоотвода, особенно на начальной стадии аварии. В то же время влияние неконденсирующихся газов на теплоотвод становится существенно меньшим. В частности, время до начала разогрева активной зоны увеличивается до 136800 с (1 сут. 14 ч), а до начала повреждения топлива — до 150000 с (1 сут. 18 ч), или примерно на 25 % по сравнению с компоновкой ТОАР на одном уровне с ПГ.

Основным фактором, влияющим на уменьшение эффективности СПОТ, является сокращение поверхности теплообмена в ТОАР из-за наличия в первом контуре азота. Существенное влияние на эффективность теплоотвода СПОТ оказывают и такие факторы, как блокирование азотом подводящих трубопроводов, перераспределение расхода теплоносителя между петлями СПОТ, а также нестационарные процессы в этих петлях. Блокирование расхода теплоносителя азотом, находящимся в “восходящем” вертикальном участке подводящего трубопровода ТОАР, приводит к тому, что температура среды в последнем оказывается существенно ниже, чем на выходе из активной зоны реактора.

В варианте компоновки СПОТ “0 м” подобное явление отсутствует, и разогрев активной зоны наступает, примерно, через 136000 с с начала аварии против 106000 с варианта “5 м”, а следовательно, имеется дополнительный, примерно 30 %-й запас по продолжительности безопасного состояния РУ.

Не всегда однозначно на эффективность СПОТ влияет увеличение объемного содержания азота в первом контуре, т.к., наряду с изменением содержания азота, со временем изменяется паросодержание в объеме ТОАР из-за постепенного перехода от недогретого теплоносителя к пароводяной смеси. Причем, наличие двухфазного потока в большей степени влияет на эффективность ТОАР, расположенного по варианту “5 м”.

Кроме того, размещение ТОАР по варианту “0 м” обеспечивает в условиях течи поддержание более высокого уровня теплоносителя H в реакторе, и, соответственно, его запаса M в реакторе и первом контуре (рис. 3, а, в, г, соответственно). Это наблюдается практически на всем этапе переходного процесса после попадания азота в первый контур. Причем, в варианте “5 м” из-за заполнения всего объема КД жидкой фазой (см. рисунок 3, б, горизонтальный участок кривой) возрастание расхода в течь будет происходить существенно раньше, примерно на 10000 с, чем в варианте “0 м”.

Следовательно, расположение ТОАР по варианту “0 м” является более предпочтительным при длительном обесточивании блока с наложением малой течи первого контура и попаданием в него азота.

В таблице приведена сравнительная хронология основных этапов развития рассмотренной аварии для разных вариантов компоновки СПОТ.

Сравнительная хронология основных этапов развития аварии

Событие	Время с начала аварии, с (сут., ч)			
	Варианты компоновки СПОТ			
	без СПОТ	без азота	“5 м”	“0 м”
ИС: полное обесточивание + открытие течи	20	20	20	20
Подключение СПОТ	—	2420	2520	2520
Начало слива ГЕ САОЗ	—	4500	5050	5550
Завершение работы ГЕ САОЗ	—	38200 – 39600	—	—
Завершение слива из ГЕ САОЗ — проникновение азота в первый контур	—	—	43900	47400
Начало устойчивого разогрева топлива в активной зоне реактор	9400 (2,5)	220 000 (2 сут. 13 ч)	108 300 (1 сут. 6 ч)	136 800 (1 сут. 14 ч)
Начало тяжелого повреждения топлива, $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$	10800 (3 ч)	236 400 (2 сут. 18 ч)	120 000 (1 сут. 9 ч)	150 000 (1 сут. 18 ч)

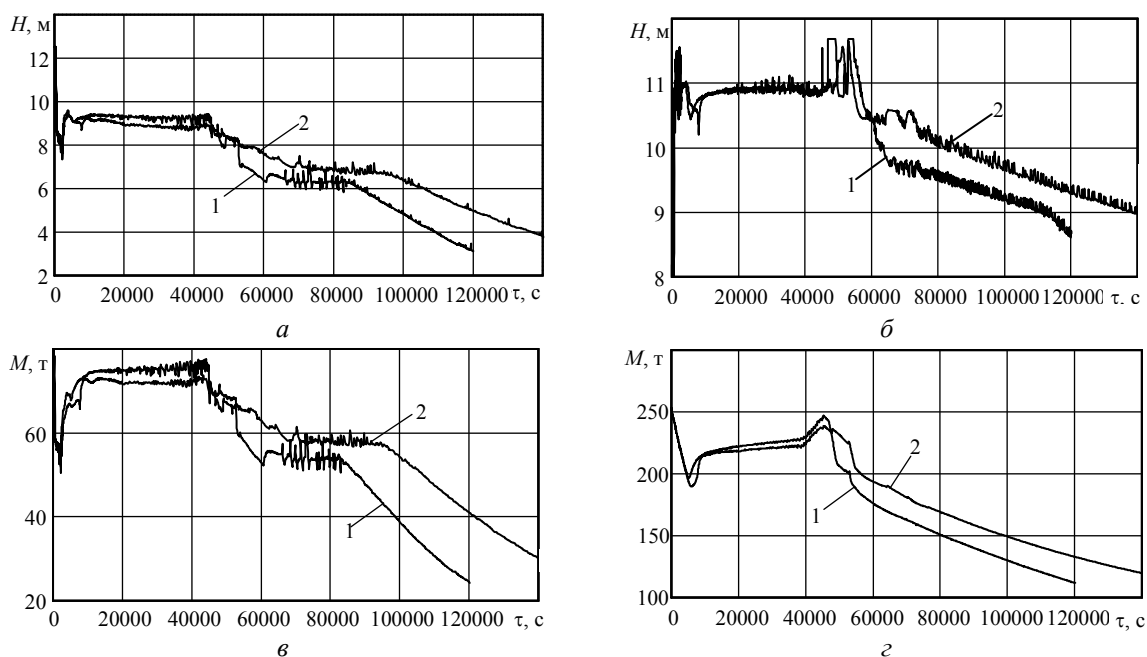


Рис. 3. Сравнительные характеристики уровней H теплоносителя в реакторе (а) и в КД (б); запасов M теплоносителя в реакторе (в) и в первом контуре (без ГЕ САОЗ и ТОАР) (г); компоновка автономной СПОТ с расположением ТОАР на высоте 5 м с азотом (1), 0 м с азотом (2)

Таким образом, полученные методом расчетного моделирования результаты подтверждают, что попадание азота в первый контур, хотя и снижает эффективность теплоотвода автономной термосифонной СПОТ, не приводит к потере ее работоспособности. За счет оптимальной компоновки теплообменного оборудования в условиях рассмотренной аварии возможно увеличение запаса времени до начала разогрева топлива в активной зоне реактора не менее, чем на 25...30 %, а по сравнению со схемой РУ без СПОТ — более чем на порядок. Даже с учетом снижения начального движущего напора ЕЦ теплоносителя первого контура в петлях СПОТ система сохраняет достаточную эффективность, обеспечивая устойчивое снижение параметров РУ, и способна достаточное время надежно поддерживать РУ в безопасном состоянии.

Литература

1. Патент 81419 Україна, МПК8 G21C15/18. Пасивна система відведення залишкових тепловиділень / Свириденко І.І.; Заявник і патентовласник СевНТУ. — № а 2005 00392; заявл. 17.01.2005; опубл. 10.01.2008. // Бюл. — 2008. — № 1.
2. Sarrette C. Effect of Noncondensable Gases on Circulation of Primary Coolant in Nuclear Power Plants in Abnormal Situations [Электронный ресурс]: Thesis for the degree of Doctor of Science (Technology) to be presented with due permission for public examination and criticism in the Auditorium of the Student Union House at Lappeenranta University of Technology. — Lappeenranta, Finland, 14.02.2003. — 116 pp. — Электрон. текстовые данные (2080123 bytes). — Digipaino: Lappeenranta University of Technology, 2003. — https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/31154/TMP_objres.367_pdsequence=1. — 20.10.09.
3. Гудошников, А.Н. Дополнительная верификация модели поведения неконденсирующихся газов РК КОРСАР/ГП / А.Н. Гудошников, Ю.А. Мигров // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР [Электронный ресурс]: Материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф., 26 — 29 мая 2009 г. — Подольск: ФГУП ОКБ “Гидропресс”, 2009. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
4. Калякин, С.Г. Исследование влияния неконденсирующихся газов на конденсационную мощность парогенератора НВ АЭС-2 при работе пассивных систем безопасности и течах из первого контура / С.Г. Калякин [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР [Электронный ресурс]: Материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф., 26 — 29 мая 2009 г.. — Подольск: ФГУП ОКБ “Гидропресс”, 2009. — 1 электрон. опт. диск (CD—ROM).
5. Свириденко, И.И. Особенности аварийного процесса при малой некомпенсируемой течи ВВЭР-1000 с использованием автономной СПОТ / И.И. Свириденко // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. — Севастополь, 2007. — Вип. 3 (23). — С. 100 — 108.

Рецензент канд. техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Киров В.С.

Поступила в редакцию 25 сентября 2009 г.