

УДК 621.039.586

И.И. Свириденко, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: emss@stel.sebastopol.ua***АВТОНОМНАЯ ПАССИВНАЯ СИСТЕМА АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ
ВВЭР-1000 НА ОСНОВЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДВУХФАЗНЫХ
ТЕРМОСИФОНОВ**

Рассматривается автономная пассивная система аварийного расхолаживания реакторной установки АЭС с ВВЭР-1000 на основе теплообменного оборудования с низкотемпературными двухфазными термосифонами. Представлены результаты расчетного моделирования отвода остаточных тепловыделений реактора в условиях максимальной запроектной аварии с полным длительным обесточиванием.

Автономные системы пассивного отвода остаточных тепловыделений (СПОТ) на основе двухфазных термосифонов (ДТС) обеспечивают существенное повышение безопасности реакторных установок (РУ) в аварийных условиях, вызванных полным длительным обесточиванием. Их функционирование не зависит от состояния и работоспособности основного энергетического оборудования РУ, а также участия персонала в управлении аварийным процессом. Основными преимуществами СПОТ с ДТС являются: автономность в работе, высокая теплопередающая способность, минимальное внутреннее термическое сопротивление, минимальное внешнее гидравлическое сопротивление, высокая компактность теплообменного оборудования из-за отсутствия камер для подвода/отвода внешнего теплоносителя, способность к трансформации тепловых потоков. Наиболее важная особенность теплообменного оборудования с ДТС заключается в том, что каждый из элементов, образующих его теплопередающую поверхность, является автономным замкнутым промежуточным контуром теплопередачи, и обеспечивает надежность разделения теплоносителя первого контура и охлаждающей среды. Перечисленные преимущества теплообменного оборудования с ДТС дают основание его использовать в системах аварийного отвода теплоты РУ [1].

В Севастопольском национальном техническом университете разработаны различные варианты схем автономных СПОТ с ДТС, каждая из которых имеет свои особенности компоновки и функционирования [2]. Включение разработанных автономных СПОТ с ДТС в состав систем безопасности РУ нового поколения требует проведения детального расчетного моделирования процессов теплоотвода в нормальных и аварийных условиях эксплуатации с использованием стандартных теплогидравлических кодов.

Целью выполненного расчетного моделирования является определение условий эффективного и надежного отвода остаточных тепловыделений активной зоны реактора с помощью автономной СПОТ с ДТС в условиях максимальной запроектной аварии (МЗА) с отказом всех источников электроснабжения собственных нужд, включая аварийные. В связи с тем, что расхолаживание реактора в условиях данной МЗА возможно лишь при естественной циркуляции (ЕЦ) первого контура, необходимо проведение анализа влияния схемы автономной СПОТ с ДТС для определения условий ее функционирования в составе РУ, обеспечивающих устойчивость ЕЦ. Критерием успеха в данной аварийной ситуации является снижение параметров активной зоны реактора до безопасного состояния через каналы СПОТ без ограничений по теплоотводу, продолжительности переходного процесса и нарушения устойчивости ЕЦ теплоносителя.

На рисунке 1 изображена схема автономной СПОТ на основе теплообменного оборудования с ДТС для реакторной установки АЭС с ВВЭР-1000, состоящая из четырех независимых каналов расхолаживания, каждый из которых включает конвективную петлю с ЕЦ теплоносителя первого контура, теплообменник аварийного расхолаживания (ТОАР) на основе ДТС, двухфазный промежуточный теплоотводящий контур (ПТК), выходящий за пределы гермооболочки и соединяющий ТОАР с теплообменником-конденсатором (ТК). ТК расположен в баке аварийного отвода теплоты (БАОТ). Для повышения эффективности СПОТ применяется газожидкостная интенсификация теплоотдачи от наружной поверхности ТК конечному поглотителю, в качестве которого используется вода БАОТ.

Расчетное моделирование работы автономной термосифонной СПОТ проведено для условий МЗА с полным длительным обесточиванием на модели РУ ВВЭР-1000/В-320 энергоблока № 1 Хмельницкой АЭС с отказом всех аварийных дизельгенераторов и невозможностью подключения внешних источников электроснабжения. Расчет выполнен для начальных условий работы реактора на 100 %-ой мощности. Моделируется режим аварийного отвода остаточных тепловыделений РУ с уровня мощности, принятого соответствующим худшему возможному варианту: уровню, достигаемому на конец кампании топливной

загрузки реактора. Мощность остаточных тепловыделений по сравнению со стандартом ANS79-1 завышена на 10 %, что обеспечивает достаточный консерватизм, независимо от периода кампании. В течение всего рассматриваемого переходного процесса предполагается отсутствие какого-либо вмешательства со стороны оперативного персонала в протекание аварийного режима, с одним лишь предусмотренным проектом РУ ВВЭР-1000/В-320 действием штатных защит, блокировок и систем безопасности.

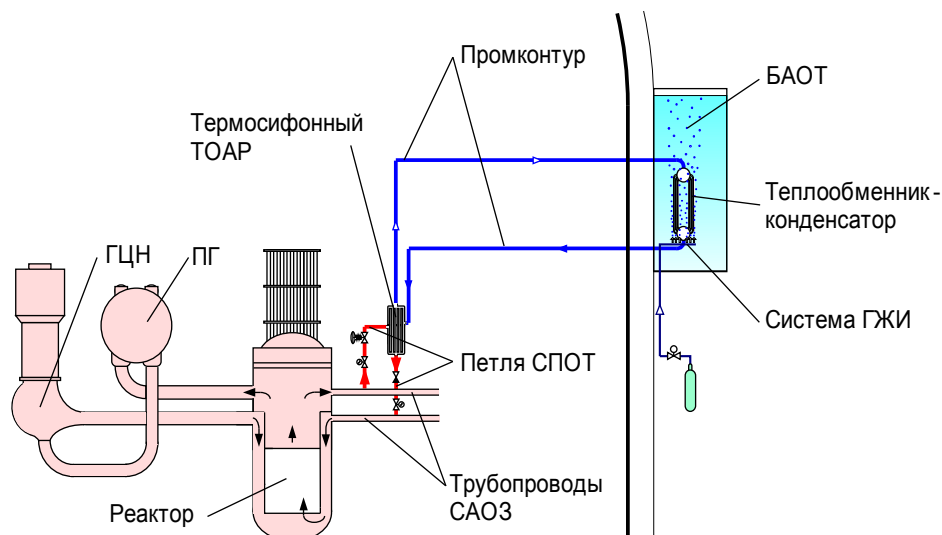


Рисунок 1 – Схема автономной СПОТ с ДТС реакторной установки АЭС с ВВЭР

Исходное событие аварии – обесточивание РУ происходит на 10-ой секунде рассматриваемого процесса. Момент подключения СПОТ после обесточивания выбран из условия гарантированного недопущения открытия импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления (КД), так как в случае возможной его последующей неспадки начнется течь 1-го контура без возможности подпитки, что существенно усложнит протекание рассматриваемого аварийного процесса.

После обесточивания и срабатывания аварийной защиты реактора отвод остаточных тепловыделений активной зоны осуществляется через парогенераторы (ПГ). Наблюдаемые колебания расхода теплоносителя в активной зоне (рисунок 2) и температуры теплоносителя (рисунок 3) в главном циркуляционном контуре (ГЦК) связаны с изменением параметров 2-го контура в ПГ из-за периодически срабатывающих предохранительных клапанов ПГ. Эти колебания продолжаются до 2410 секунды переходного процесса, когда к отводу остаточных тепловыделений РУ подключается автономная СПОТ.

После ввода в действие СПОТ наблюдаемые осцилляции расхода и температуры теплоносителя за счёт постоянного изменения температурного напора между 1-ым и 2-ым контуром некоторое время продолжают, затем полностью затухают. Для рассматриваемой схемы СПОТ продолжительность неустойчивого переходного процесса после ее подключения к РУ составляет не более 5 минут. Столь короткая продолжительность неустойчивого переходного процесса достигается тем, что охлажденный в ТОАР теплоноситель поступает сразу в реактор и обеспечивает эффективное охлаждение активной зоны.

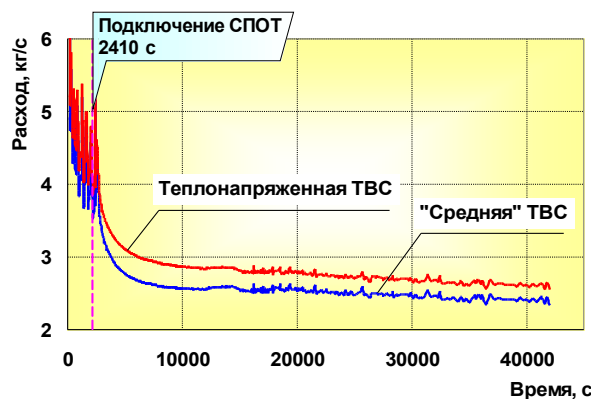


Рисунок 2 – Изменение расхода теплоносителя 1-го контура в активной зоне

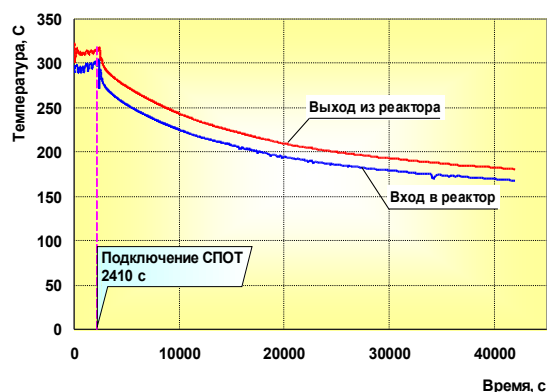


Рисунок 3 – Изменение температуры теплоносителя 1-го контура

Эффективность расхолаживания РУ термосифонной СПОТ иллюстрируется темпами снижения давления 1-го контура (рисунок 4). Уже на 16550 секунде уровень давления составляет 6 МПа, что соответствует проектному для РУ В-320 значению давления подключения гидроемкостей системы аварийного охлаждения активной зоны.

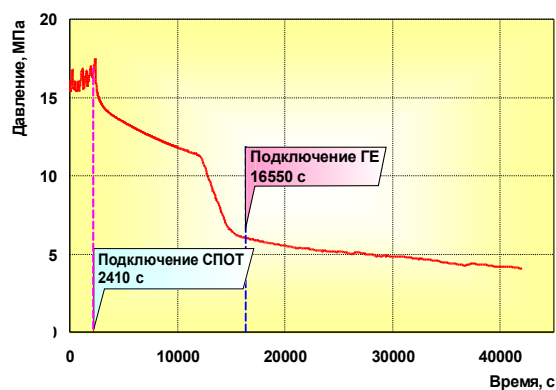


Рисунок 4 – Изменение давления теплоносителя 1-го контура

Характерной особенностью рассматриваемого переходного процесса является то, что в условиях потери эффективного теплоотвода по 2-му контуру, СПОТ обеспечивает расхолаживание не только реактора, но и ПГ. В связи с этим на характер процесса отвода остаточных тепловыделений РУ оказывают влияние, в первую очередь, особенности расхолаживания термосифонными теплообменниками именно парогенераторов. Так как расхолаживание ПГ осуществляется потоком теплоносителя, проходящим через реактор, в течение практически всего переходного процесса расход теплоносителя по петлям ГЦК поддерживается практически на одинаковом уровне, составляющем для рассматриваемых условий около 70 кг/с (рисунок 5).

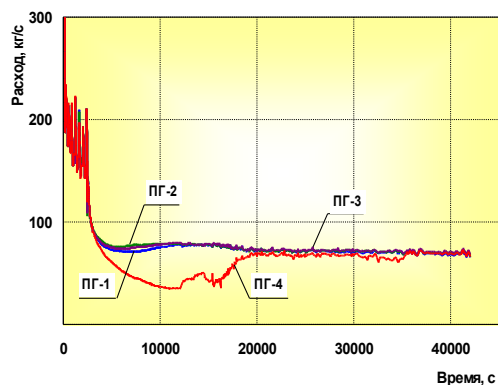


Рисунок 5 – Изменение расхода теплоносителя 1-го контура через ПГ

Отклонение параметров расхода 1-го контура в четвертой петле ГЦК по сравнению с остальными петлями связано с подключенным к этой петле КД, из которого в рассматриваемом переходном процессе

идет постоянная подпитка 1-го контура «горячим» теплоносителем. После 12000 секунды, когда КД уже полностью опорожнен (рисунок 6), эти отклонения уменьшаются и к 20000 секунде переходного процесса во всех петлях ГЦК обеспечивается практически одинаковая скорость ЕЦ теплоносителя (рисунок 5).

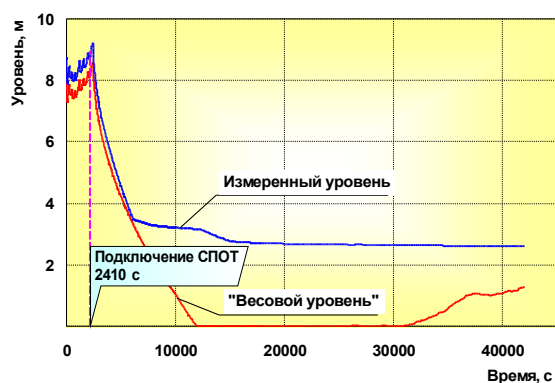


Рисунок 6 – Снижение уровня теплоносителя 1-го контура в КД

В связи с тем, что подача охлаждающего теплоносителя в нижнюю камеру смешения реактора осуществляется от двух диаметрально противоположных патрубков САОЗ, особое значение для надежности теплоотвода от активной зоны в условиях ЕЦ 1-го контура имеет отсутствие «перекося» температуры охлаждающих потоков. Одинаковый характер изменения расхода через ТОАР-1, 2, 3, 4 (рисунок 7) иллюстрирует «симметричность» теплоотвода по всем петлям СПОТ и обеспечивает равномерность теплоотвода от активной зоны в условиях относительно малых скоростей теплоносителя.

«Симметричность» работы петель СПОТ подтверждается и одинаковыми значениями давления в ДТС всех ТОАР (рисунок 8), а также практически одинаковым уровнем давления в промежуточных контурах СПОТ (рисунок 9). Однако, по сравнению с термосифонными сборками ТОАР, в промежуточных контурах СПОТ наблюдаются существенные осцилляции давления.

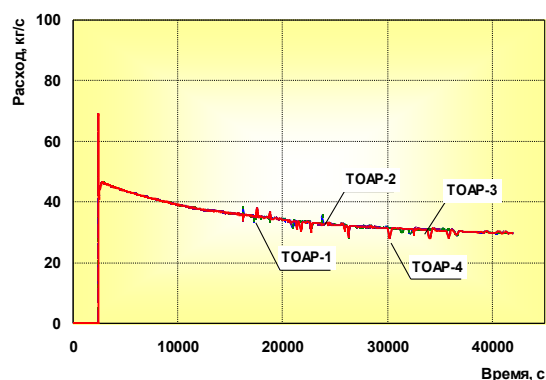


Рисунок 7 – Расход теплоносителя 1-го контура по петлям расхолаживания

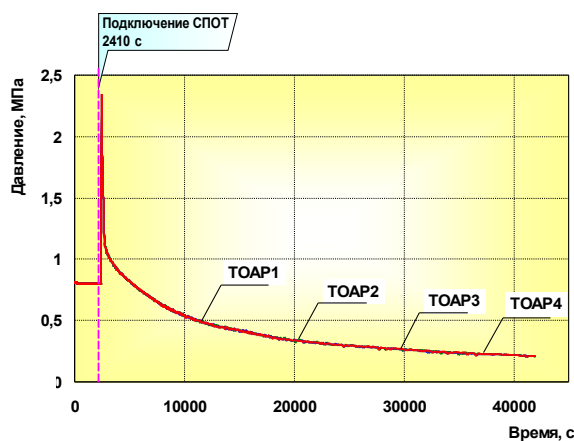


Рисунок 8 – Давление в ДТС ТОАР-1, 2, 3, 4

Скачкообразное изменение давления связано со взрывообразным характером процесса испарения теплоносителя в испарителе ПТК. Ввиду стесненности термосифонной сборки в ТОАР и относительно малого объема испарителя промконтура значительная часть пароводяной смеси при испарении постоянно выбрасывается из ТОАР и уносится в паровой трубопровод и в теплообменник-конденсатор, снижая тем самым параметры пара и увеличивая гидродинамическое сопротивление циркуляционного тракта. Это определенным образом ухудшает условия теплопереноса в промконтуре.

Кроме того, при вводе СПОТ в действие с набросом тепловой нагрузки испарение в промконтуре происходит в условиях недогрева, который может составлять 4...6 градусов. В этом случае в процессе парообразования при отрыве от теплообменной поверхности паровым пузырям приходится проходить через определенный слой недогретой жидкости, что вызывает интенсивную конденсацию пара и схлопывание пузырей. Данное явление также вносит определенный вклад в неустойчивость процесса теплоотвода в промконтуре.

Приведенные особенности теплопереноса в промконтуре, полученные методом расчетного моделирования, подтверждены проведенными автором экспериментальными исследованиями и визуальными наблюдениями на теплофизическом стенде [3].

По мере снижения уровня отводимой тепловой мощности, начиная, примерно с 30000 секунды переходного процесса колебания давления в промконтуре несколько стабилизируются, а частота осцилляций уменьшается.

Сравнение теплоотводящей способности СПОТ с уровнем остаточных тепловыделений РУ (рисунок 10) показывает, что, несмотря на определенные колебания параметров теплоносителя промконтура, на всем этапе переходного процесса СПОТ обеспечивает необходимый отвод теплоты, а в начальный, наиболее ответственный его период аварийная система имеет 28 %-ый запас по уровню теплоотвода.

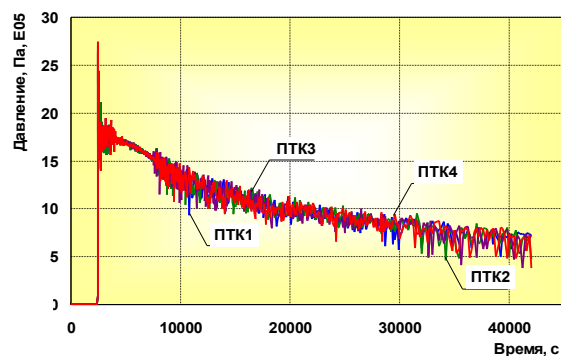


Рисунок 9 – Значения давления в петлях ПТК–1, 2, 3, 4

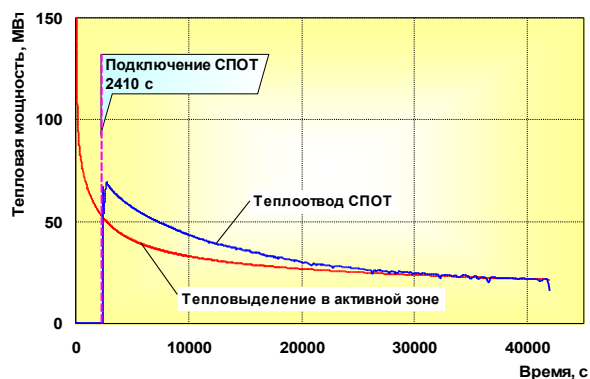


Рисунок 10 – Сравнение теплоотводящей способности СПОТ с уровнем тепловыделений РУ

Таким образом, полученные результаты расчетного моделирования переходного процесса аварийного расхолаживания РУ ВВЭР–1000 в условиях МЗА с полным длительным обесточиванием показывают эффективность и надежность отвода остаточных тепловыделений автономной термосифонной СПОТ. Даже при наличии определенных колебаний параметров в промконтуре, характерных для всех испарительно-конденсационных устройств кольцевого типа, СПОТ обеспечивает

устойчивость ЕЦ в активной зоне реактора на всем этапе переходного процесса. Этот фактор является основным, подтверждающим безопасность расхолаживания РУ.

Полученные характеристики свидетельствуют о правильности выбранной концепции формирования автономных СПОТ с термосифонным теплообменным оборудованием, функционирование которых не зависит от работоспособности и состояния основного оборудования РУ. Направлением дальнейшей работы должен стать этап проектной разработки автономных термосифонных СПОТ. Представленные результаты рекомендуется использовать в проектных решениях пассивных систем безопасности реакторных установок АЭС нового поколения, строительство которых планируется в Украине в ближайшем будущем.

Библиографический список

1. Свириденко И.И. Классификация систем пассивной тепловой защиты ядерно-опасных объектов с использованием тепловых труб / И.И. Свириденко // Ядерная и радиационная безопасность. — 2005. — № 4. — С. 37 – 48.

2. Исследование и разработка высокоэффективных экобезопасных тепловых схем ядерных и тепловых энергоустановок («Контур». Направление – атомная энергетика). Компоновка, схемы и режимы работы автономных пассивных систем аварийного расхолаживания ЯЭУ: отчет о НИР (заключит.). Том 3 / Севастоп. национ. технич. ун-т; рук. Федоровский К.Ю.; исполн. Свириденко И.И. [и др.]. — Севастополь, 2005. — 161 с. — № ГР 0103U001417. Инв. № 0205U007159.

3. Свириденко И.И. Особенности сопряженного теплообмена в многоконтурных системах охлаждения с двухфазными теплоносителями / И.И. Свириденко // Вестник СевГТУ. Сер. Физика и математика: сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — Вып. 43. — С. 158 – 170.

Поступила в редакцию 13.11.2007 г.