

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-433-450>

УДК 621.039.58

## **Автономная термосифонная система пассивного отвода теплоты от первого контура реакторной установки: особенности функционирования, характеристики и основные преимущества**

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

<sup>1)</sup>Севастопольский государственный университет (Севастополь, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации  
атомных электростанций» (Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023  
Belarusian National Technical University, 2023

**Реферат.** Рассмотрена автономная система пассивного отвода остаточного тепловыделения (СПОТ) реакторной установки с ВВЭР, предназначенная для обеспечения безопасности АЭС в условиях аварии с полным длительным обесточиванием. Система предусматривает отвод теплоты непосредственно от первого контура реакторной установки (СПОТ Р). С целью повышения надежности и безопасности аварийного теплоотвода в системе применено теплообменное оборудование на основе испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа – двухфазных термосифонов. Основной особенностью таких теплообменников является то, что их термосифонные сборки конструктивно разделяют первый контур и промконтур СПОТ, выводимый за пределы реакторного отделения, и позволяют обеспечить безопасный и эффективный теплоотвод, снижают риск распространения радиоактивных загрязнений за барьеры безопасности. Подобные автономные пассивные системы обеспечат эффективный теплоотвод непосредственно от первого контура, изменив цепочку последовательных участков теплопереноса от ядерного топлива к конечному поглотителю и исключив из нее элементы, например парогенераторы, состояние и работоспособность которых в аварийном процессе теплоотвода оказывают основное влияние на безопасность активной зоны. В статье представлена схема автономной системы теплоотвода, приведено описание ее работы. Рассмотрены основные характеристики протекания аварийного процесса отвода остаточного тепловыделения автономной термосифонной СПОТ Р, полученные методом расчетного моделирования. Проанализированы преимущества автономной термосифонной пассивной системы в сравнении с пассивной системой отвода теплоты реакторной установки с ВВЭР через второй контур (СПОТ ПГ). Полученные результаты предлагаются для решения задач диверсификации пассивных систем безопасности эволюционных реакторных установок АЭС с ВВЭР.

**Ключевые слова:** АЭС, ВВЭР, реакторная установка, система пассивного отвода теплоты, двухфазный термосифон, полное длительное обесточивание, расчетное моделирование

**Для цитирования:** Свириденко, И. И. Автономная термосифонная система пассивного отвода теплоты от первого контура реакторной установки: особенности функционирования, характеристики и основные преимущества / И. И. Свириденко, Д. В. Шевелев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 5. С. 433–450. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-433-450>

---

### **Адрес для переписки**

Свириденко Игорь Иванович  
Севастопольский государственный университет  
ул. Университетская, 33,  
299053, г. Севастополь, Российская Федерация  
Тел.: +7 978 704-68-74  
[i.sviridenko@mail.ru](mailto:i.sviridenko@mail.ru)

---

### **Address for correspondence**

Sviridenko Igor I.  
Sevastopol State University  
33, University st.,  
299053, Sevastopol, Russian Federation  
Tel.: +7 978 704-68-74  
[i.sviridenko@mail.ru](mailto:i.sviridenko@mail.ru)

---

## Autonomous Thermosiphon System of Passive Residual Heat Removal from the Primary Circuit of the Reactor Plant: Features of Operation, Characteristics and Basic Advantages

I. I. Sviridenko, D. V. Shevelyov

<sup>1)</sup>Sevastopol State University (Sevastopol, Russian Federation),

<sup>2)</sup>All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation JSC (Moscow, Russian Federation)

**Abstract.** An autonomous system of passive removal of residual heat (PRRHS) of a reactor installation with VVER designed to ensure the safety of nuclear power plants in an accident with complete long-term blackout is considered. The system provides for the removal of heat directly from the first circuit of the reactor plant (PRRHS R). In order to increase the reliability and safety of the emergency heat sink, heat exchange equipment based on closed-type evaporation and condensation devices – two-phase thermosyphons – has been used in the system. The main feature of such heat exchangers is that their thermosiphon assemblies structurally separate the primary circuit and the auxiliary circuit of the PRRHS, which is removed outside the reactor compartment, and provide safe and efficient heat removal, reduce the risk of radioactive contamination spreading beyond safety barriers. Such autonomous passive systems will provide effective heat removal directly from the primary circuit by changing the chain of successive heat transfer sites from nuclear fuel to the final absorber and excluding from it such elements, as for example steam generators, the condition and operability of which in the emergency process of heat removal have a major impact on the safety of the reactor core. The article presents a diagram of an autonomous heat sink system; also, a description of its operation is given. The main characteristics of the course of the emergency process of removal of residual heat by the autonomous thermosiphon PRRHS R obtained by computational modeling have been considered. The advantages of an autonomous thermosiphon passive system in comparison with a passive heat removal system of a reactor installation with VVER through the second circuit are analyzed. The obtained results are proposed to solve the problems of diversification of passive safety systems of evolutionary reactor plants of nuclear power plants with VVER type reactors.

**Keywords:** nuclear power plant, VVER, reactor plant, passive heat removal system, two-phase thermosiphon, complete long-term blackout, computational modeling

**For citation:** Sviridenko I. I., Shevelyov D. V. (2023) Autonomous Thermosiphon System of Passive Residual Heat Removal from the Primary Circuit of the Reactor Plant: Features of Operation, Characteristics and Basic Advantages. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (5), 433–450. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-433-450> (in Russian)

### Введение

Проблеме безопасности реакторных установок (РУ) атомных электростанций (АЭС) уделяется особое внимание [1–3]. Наиболее эффективным способом обеспечения безопасности реакторных установок РУ АЭС при аварии с полным длительным обесточиванием является создание условий для естественной циркуляции (ЕЦ) теплоносителя первого контура через активную зону реактора с целью отвода остаточного тепловыделения ядерного топлива. При этом для сохранения устойчивости ЕЦ должны обеспечиваться абсолютная надежность и эффективность внешнего теплоотвода от первого контура [4–8].

Высокая надежность и эффективность внешнего теплоотвода может быть достигнута применением испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа – низкотемпературных двухфазных термосифонов (ДТС) [9–11]. Использование теплообменного оборудования на основе ДТС в РУ АЭС позволит сформировать автономные пассивные системы безопасности, функционирование которых не будет зависеть от эксплуатационного со-

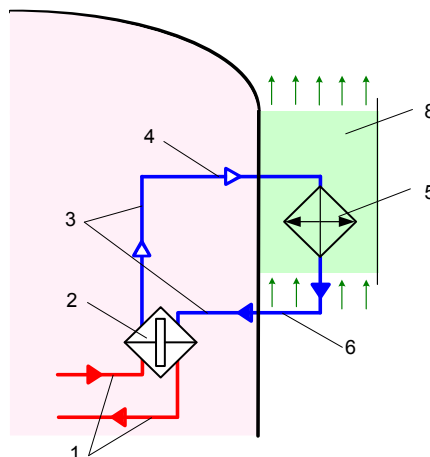
стояния и работоспособности основного оборудования РУ – парогенераторов (ПГ). Такие пассивные системы (рис. 1) обеспечат эффективный теплоотвод непосредственно от первого контура, изменив цепочку последовательных участков теплопереноса от ядерного топлива к конечному поглотителю и исключив из нее элементы, состояние и работоспособность которых в аварийном процессе теплоотвода оказывают основное влияние на безопасность активной зоны.

Рис. 1. Принципиальная схема автономной пассивной системы отвода остаточного тепловыделения с термосифонным теплообменником аварийного расхолаживания:

- 1 – первый контур; 2 – термосифонный теплообменник аварийного расхолаживания;  
3 – промконтур; 4 – паровой трубопровод;  
5 – теплообменник-конденсатор;  
6 – конденсатный трубопровод;  
8 – конечный поглотитель

Fig. 1. The principal circuit diagram of the autonomous passive residual heat removal system with thermosiphon based heat exchanger of emergency cooling:

- 1 – primary circuit; 2 – thermosiphon heat exchanger; 3 – auxiliary circuit; 4 – steam pipeline;  
5 – heat exchanger-condenser; 6 – condensate pipeline; 8 – ultimate sink



В качестве основного элемента теплоотвода в рассматриваемой пассивной системе используется ординарный двухфазный термосифон – испарительно-конденсационное устройство замкнутого типа, теплоперенос в котором осуществляется передачей скрытой теплоты парообразования своего промежуточного теплоносителя с испарением на участке подвода теплоты, перемещением пара из испарителя в конденсатор и конденсацией пара на участке теплоотвода [12]. Возврат конденсата из зоны конденсации ДТС в его испаритель обеспечивается действием массовых сил. Внешний подвод и отвод теплоты происходят через стенки соответственно испарительного и конденсационного участков ДТС [13].

Теплопередающая поверхность теплообменника аварийного расхолаживания (ТОАР) формируется сборкой вертикальных ординарных ДТС. Являясь автономным замкнутым устройством теплоотвода, ДТС конструктивно разделяют среды внешних контуров, что дает основание рассматривать их как дополнительный промежуточный замкнутый участок теплопереноса с высокой эффективной теплопроводностью, надежно отделяющий первый контур от внешнего контура теплоотвода.

Целью статьи являются описание устройства и принципа действия, анализ особенностей функционирования и полученных расчетных характеристик, а также обсуждение основных преимуществ автономной системы пассивного отвода остаточного тепловыделения на основе ДТС.

### Устройство и принцип действия автономной термосифонной СПОТ

Назначение автономной термосифонной системы пассивного отвода теплоты (АТ СПОТ) – отвод остаточного тепловыделения в активной зоне

реактора в условиях аварии с полным длительным обесточиванием и потерей источников электроснабжения, включая аварийные. В состав АТ СПОТ (рис. 2) входят две системы: система пассивного отвода теплоты от первого контура реакторной установки (СПОТ Р) и система пассивного расхолаживания компенсатора давления (СПР КД) [14].

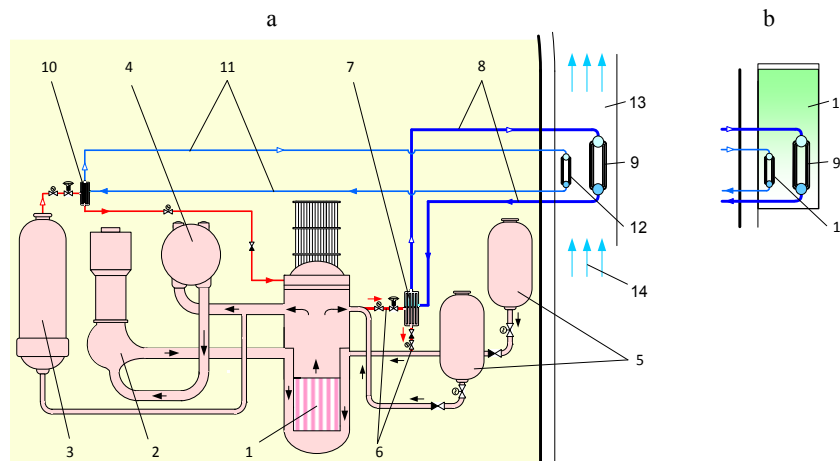


Рис. 2. Схема автономной термосифонной системы пассивного отвода остаточного тепловыделения: 1 – реактор; 2 – главный циркуляционный насос; 3 – компенсатор давления; 4 – парогенератор; 5 – гидроемкости пассивной части системы аварийного охлаждения активной зоны; 6 – петля расхолаживания первого контура; 7 – теплообменник аварийного расхолаживания системы пассивного отвода остаточного тепловыделения от первого контура реакторной установки; 8 – промконтур системы пассивного отвода остаточного тепловыделения от первого контура реакторной установки; 9 – теплообменник-конденсатор системы пассивного отвода остаточного тепловыделения от первого контура реакторной установки; 10 – теплообменник аварийного расхолаживания; 11 – промконтур системы пассивного расхолаживания компенсатора давления; 12 – теплообменник-конденсатор системы пассивного расхолаживания компенсатора давления; 13 – воздушный канал; 14 – поток охлаждающего воздуха; 15 – бак аварийного отвода теплоты

Fig. 2. Circuit diagram of autonomous thermosiphon PRRHS: 1 – reactor; 2 – main circulation pump; 3 – pressure compensator; 4 – steam generator; 5 – hydraulic capacities of the passive part of the emergency cooling system of the core; 6 – cooling loop of the primary circuit; 7 – heat exchanger for emergency cooling of the system of passive removal of residual heat release from the primary circuit of the reactor plant; 8 – auxiliary circuit of the system of passive removal of residual heat release from the primary circuit of the reactor plant; 9 – heat exchanger-condenser of the system of passive removal of residual heat from the primary circuit of the reactor plant; 10 – emergency cooling heat exchanger; 11 – auxiliary circuit of the system of passive cooling of the pressure compensator; 12 – heat exchanger-condenser of the system of passive cooling of the pressure compensator; 13 – air channel; 14 – cooling air flow; 15 – emergency heat removal tank

СПОТ Р формируется из четырех независимых петель теплоотвода производительностью  $4 \times 33,3$  %. Каждая петля СПОТ Р включает циркуляционную петлю расхолаживания первого контура, термосифонный теплообменник аварийного расхолаживания, замкнутый двухфазный промежуточный контур и теплообменник-конденсатор (ТК). Все основные элементы АТ СПОТ размещаются в гермообъеме РУ, ТК вынесен за его пределы.

Петли расхолаживания СПОТ Р интегрированы с системой аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) на участках ее соединения с реактором: подключены попарно к верхним и нижним трубопроводам САОЗ Ду300. Остаточное тепловыделение в активной зоне и разность высот между ак-

тивной зоной и термосифонными ТОАР в петлях расхолаживания формируют условия устойчивой естественной циркуляции (ЕЦ) первого контура. Нагретый в активной зоне теплоноситель первого контура, циркулируя по трубопроводом САОЗ в подъемном участке петли расхолаживания, поступает в термосифонный ТОАР, омывая снаружи испарительные участки термосифонной сборки. За счет нагрева стенок испарителей ординарных ДТС его промежуточный теплоноситель испаряется. Пар промежуточного теплоносителя ДТС движется в зону конденсации, где конденсируется, отдавая через стенки конденсаторов теплоту промконтура, омывающему верхнее межтрубное пространство ординарных ДТС. Образовавшийся в конденсаторе ординарного ДТС конденсат промежуточного теплоносителя благодаря массовым силам возвращается в зону испарения.

Теплопередающая поверхность ТОАР сформирована на основе результатов, полученных на экспериментальном стенде СПОТ, и состоит из сборки 1519 ординарных цилиндрических ДТС наружным диаметром 25×2,5 мм и высотой испарительного участка 1,5 м, конденсационного – 1,0 м, транспортного в зоне двойной трубной доски – 0,2 м. Трубная решетка – двойная, крепление ДТС в трубной решетке осуществляется сваркой. Материал ДТС – хромоникелевая сталь 12Х18Н10Т. Промежуточный теплоноситель ДТС – вода [15].

Пар испаряющегося теплоносителя промконтура движется по паровому участку в ТК, где конденсируется на его внутренней трубной поверхности за счет охлаждения снаружи охлаждающим воздухом (рис. 2а) или водой (рис. 2б), находящейся в баке аварийного отвода теплоты (БАОТ), в зависимости от принятой схемы внешнего теплоотвода. Конденсат промконтура из трубной части ТК под действием массовых сил возвращается по конденсатному трубопроводу снова в ТОАР. Промконтур СПОТ Р работает в режиме кольцевого ДТС с разделением потоков пара и конденсата. Испарение теплоносителя промконтура осуществляется на наружной поверхности конденсаторов ординарных ДТС ТОАР, конденсация – на внутренней поверхности труб ТК.

Для создания «организованного» потока охлаждающего воздуха и увеличения его скорости теплообменник-конденсатор помещен в канал, в котором реализованы условия для естественной тяги воздуха.

При организации внешнего теплоотвода от ТК к выкипающей воде в БАОТ, предусматриваются меры аварийной подпитки последних в случае, если энергоснабжение хотя бы одного комплекта систем безопасности не будет восстановлено в течение трех суток с момента исходного события.

СПР КД предназначена для расхолаживания компенсатора давления с гарантированным снижением давления первого контура, что обеспечивает своевременное срабатывание гидроемкостей (ГЕ) пассивной части САОЗ и ввод раствора жидкого поглотителя в первый контур для предотвращения выхода реактора на повторную критичность в процессе расхолаживания.

Расхолаживание КД осуществляется пассивным отводом скрытой теплоты конденсации паровой подушки с постепенным снижением ее параметров. СПР КД формируется двумя автономными петлями производительностью 2×100 %. Термосифонные ТОАР СПР КД аналогичны конструкции ТОАР СПОТ Р, но имеют соответственно меньшую теплообменную поверхность.

СПР КД функционирует параллельно СПОТ Р. ТОАР СПР КД обеспечивает конденсацию выходящего из объема паровой подушки компенсатора пара первого контура. Конденсат из ТОАР СПР КД возвращается в верхнюю часть реактора через трубопроводы системы аварийного газоудаления. Это исключает попадание чистого конденсата в активную зону. Теплота конденсации отводится двухфазным замкнутым промконтуром СПР КД через ТК СПР КД аналогично схеме СПОТ Р [14].

### Расчетные характеристики автономной термосифонной СПОТ

Для оценки эффективности АТ СПОТ выполнено расчетное моделирование режимов пассивного отвода остаточного тепловыделения на модели РУ с ВВЭР-1000/В-320 с использованием кода RELAP5/MOD3.4. Моделирование проведено при сравнении использования воздуха и воды для внешнего теплоотвода от ТК СПОТ. Полученные результаты основных характеристик, подтверждающих эффективность и безопасность аварийного теплоотвода автономной термосифонной СПОТ, представлены на рис. 3–7.

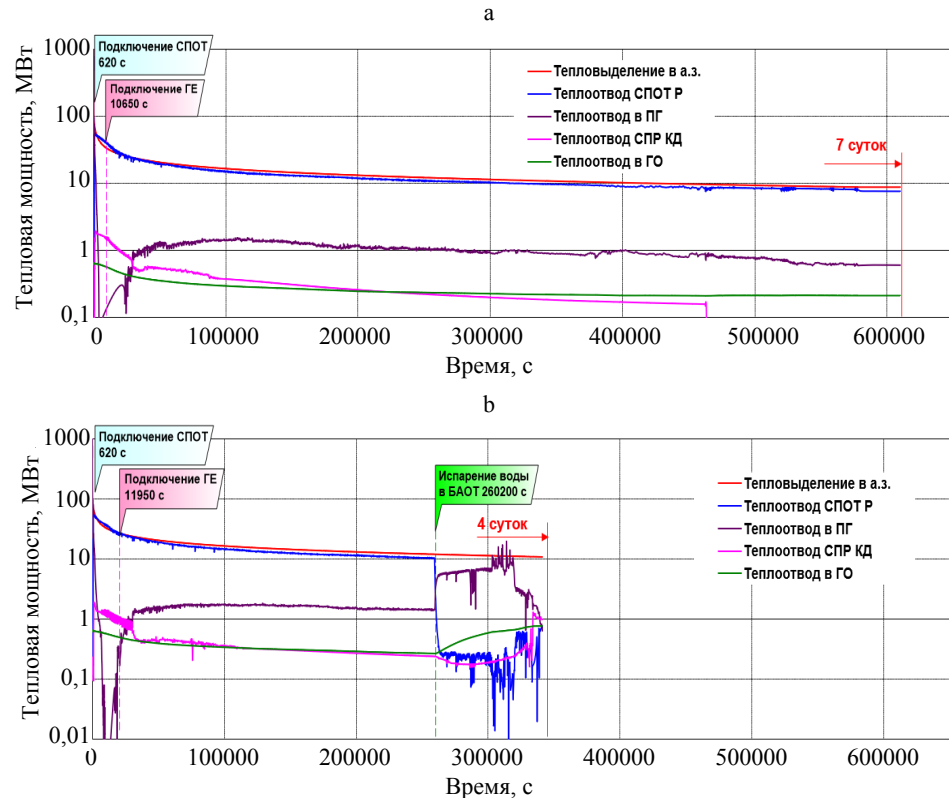


Рис. 3. Соотношение тепловыделения в активной зоне (а. з.) и отводимой тепловой мощности системой пассивного отвода остаточного тепловыделения от первого контура реакторной установки, системой пассивного расхолаживания компенсатора давления, парогенератором и гермообъемом: а – с воздушным; б – с водяным теплообменником-конденсатором

Fig. 3. The ratio of heat release in the reactor core and the heat output removal by the system of passive removal of residual heat release from the primary circuit of the reactor plant, the system of passive cooling of the pressure compensator, steam generator and sealed shell: a – with air heat exchanger-condenser; b – with a water heat exchanger-condenser

АТ СПОТ обеспечивает надежный отвод остаточного тепловыделения вне зависимости от типа конечного поглотителя. При теплоотводе к воздуху (рис. 3а) расчетная продолжительность эффективного функционирования АТ СПОТ не ограничена. При теплоотводе к воде (рис. 3б) безопасное состояние активной зоны определяется запасом воды в БАОТ и объемом воды второго контура в парогенераторах. В рассматриваемой модели запас воды в четырех БАОТ составляет 1600 т, что обеспечивает работу АТ СПОТ в течение трех суток. После полного испарения воды из БАОТ и при невозможности организации их аварийной подпитки отвод остаточного тепловыделения продолжается дополнительно еще сутки за счет сохраненного объема воды в парогенераторах.

Динамика процессов теплоотвода автономной термосифонной СПОТ с воздушными или водяными ТК практически одинакова. Наблюдающиеся небольшие отличия параметров температуры (рис. 4) и давления (рис. 5) связаны с разными температурными напорами относительно конечного поглотителя. Температура воды в БАОТ в течение практически всего времени работы АТ СПОТ составляет приблизительно 100 °С, а атмосферного воздуха не превышает 40 °С или ниже, в зависимости от места расположения АЭС и погодных условий.

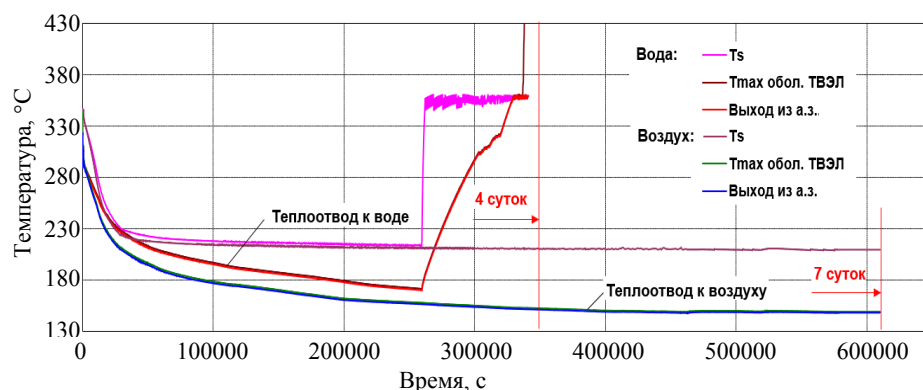


Рис. 4. Температура оболочки ТВЭЛ и теплоносителя при теплоотводе автономной термосифонной системой пассивного отвода остаточного тепловыделения к воде и к воздуху

Fig. 4. The temperature of the fuel element shell and the coolant during heat removal by an autonomous thermosiphon system of passive removal of residual heat to water and to air

Из рис. 5 видно, что при теплоотводе к воздуху давление в первом контуре стабилизируется на уровне 2 МПа к 100000 с, или спустя сутки с момента исходного события аварии. Дальнейшее снижение давления ограничивается продолжающим поступать в первый контур из ГЕ САОЗ борным концентратом. При теплоотводе к воде давление в первом контуре к окончанию третьих суток составляет 2,33 МПа.

АТ СПОТ обеспечивает расхолаживание не только первого контура, но и парогенераторов, о чем свидетельствует характер снижения давления во втором контуре (рис. 5).

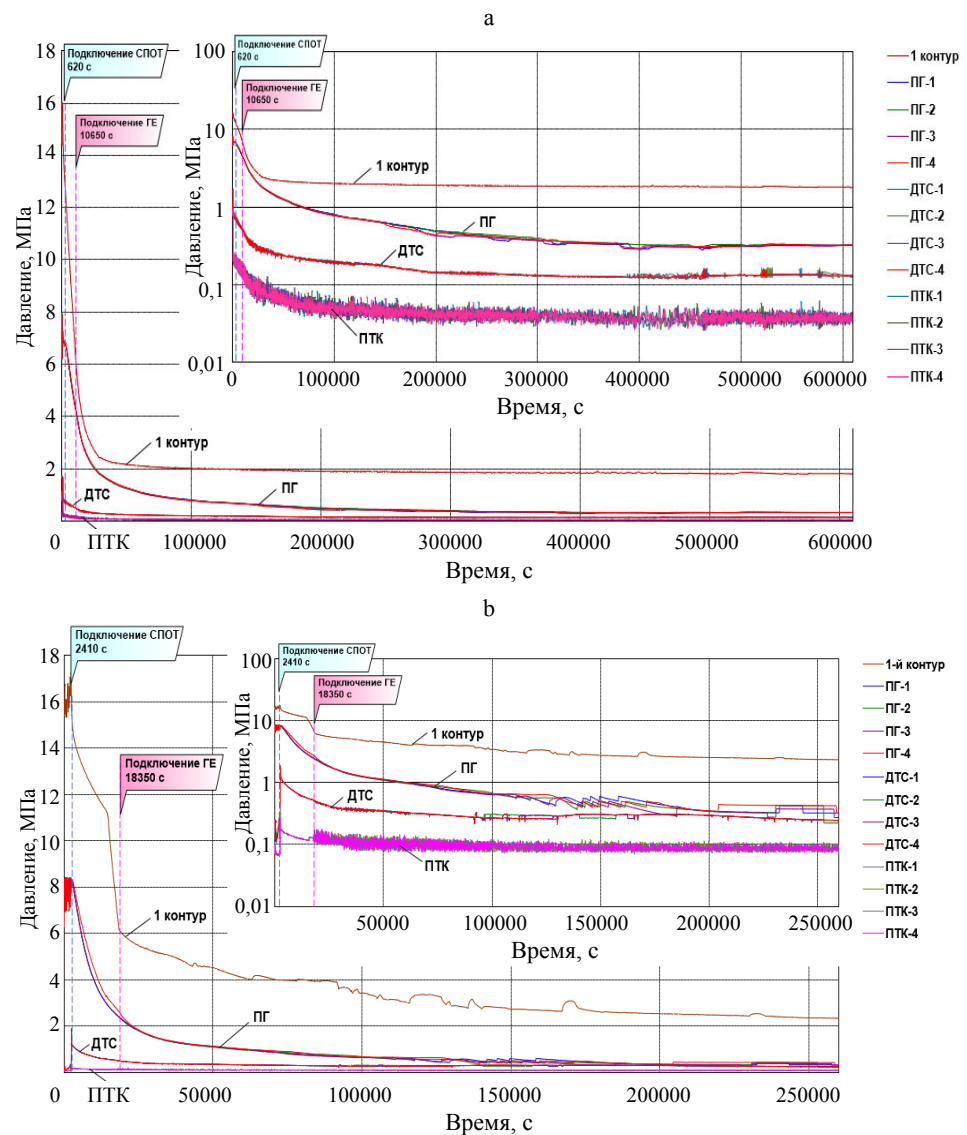


Рис. 5. Изменение давления в элементах реакторной установки и автономной системы пассивного отвода остаточного тепловыделения: а – с воздушным теплообменником-конденсатором; б – с водяным

Fig. 5. Pressure change in the reactor installation and in the autonomous passive residual heat removal system: а – with air cooled heat exchanger-condenser; б – with water cooled heat exchanger-condenser

При теплоотводе к воздуху давление в ПГ снижается и стабилизируется на уровне  $\sim 0,35$  МПа к 350000 с аварии, или спустя  $\sim 4$  сут. с момента исходного события, при теплоотводе к воде – на уровне  $\sim 0,3$  МПа к 260000 с, или спустя чуть больше 3 сут. с момента исходного события. Аналогично снижается давление в ДТС ТОАР и промконтурах ТОАР. В целом все эти три зависимости коррелируют с постепенно снижающимся уровнем остаточного энерговыделения в активной зоне (рис. 3).

На рис. 6 показано изменение реактивности в процессе расхолаживания при работе АТ СПОТ. Для расчета выбран наиболее неблагоприятный момент топливной кампании, когда концентрация бора в теплоносителе в активной зоне уже близка к нулю, а значит, положительные обратные связи по плотности теплоносителя и отрицательные по его температуре и температуре топлива максимальны. Соответственно РУ ВВЭР-1000 при расхолаживании может выйти на повторную критичность при наиболее высокой температуре теплоносителя первого контура.

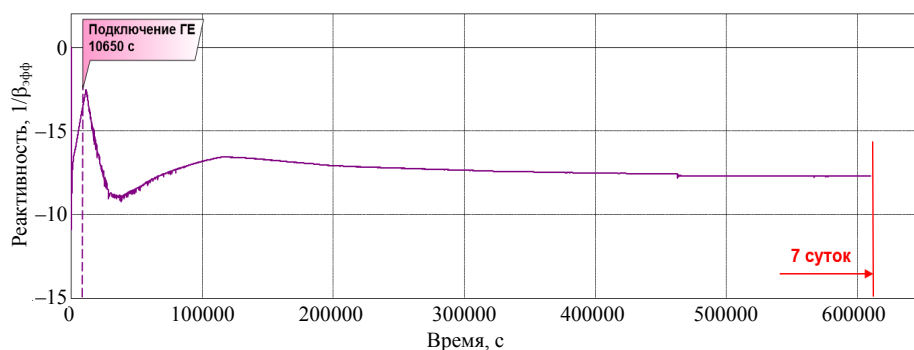


Рис. 6. Изменение реактивности при теплоотводе автономной термосифонной системой пассивного отвода теплоты

Fig. 6. Reactivity change during heat removal with autonomous thermosiphon passive heat removal system

Расчеты показали, что при этих условиях расхолаживаемая РУ может выйти на повторную критичность примерно через 18000 с с момента исходного события аварии. Однако при подключении даже одного из двух каналов СПР КД ситуация принципиально меняется. При функционировании СПР КД за счет своевременного снижения давления в первом контуре начинается слив борного концентрата из ГЕ САОЗ. Минимально возможная глубина подкритичности в момент начала срабатывания ГЕ САОЗ составляет не менее  $-3,5\beta_{эфф}$  (рис. 6). За счет ввода бора в активную зону подкритичность вновь возрастает, даже несмотря на снижение температуры и увеличение плотности теплоносителя в активной зоне. К концу расчетного интервала (7 сут.) запас подкритичности активной зоны устанавливается на уровне не менее  $-8\beta_{эфф}$ . Это означает, что даже при наихудшем сочетании нейтронно-физических параметров во время функционирования АТ СПОТ вместе с СПР КД выход РУ на повторную критичность невозможен.

На рис. 7а представлен график мгновенной скорости расхолаживания теплоносителя первого контура. Видно, что максимальное пиковое значение до 88 град/ч кратковременно достигается вскоре после ввода АТ СПОТ в действие, наброса тепловой нагрузки и установления естественной циркуляции во всех контурах АТ СПОТ, а именно через 5,5 мин.

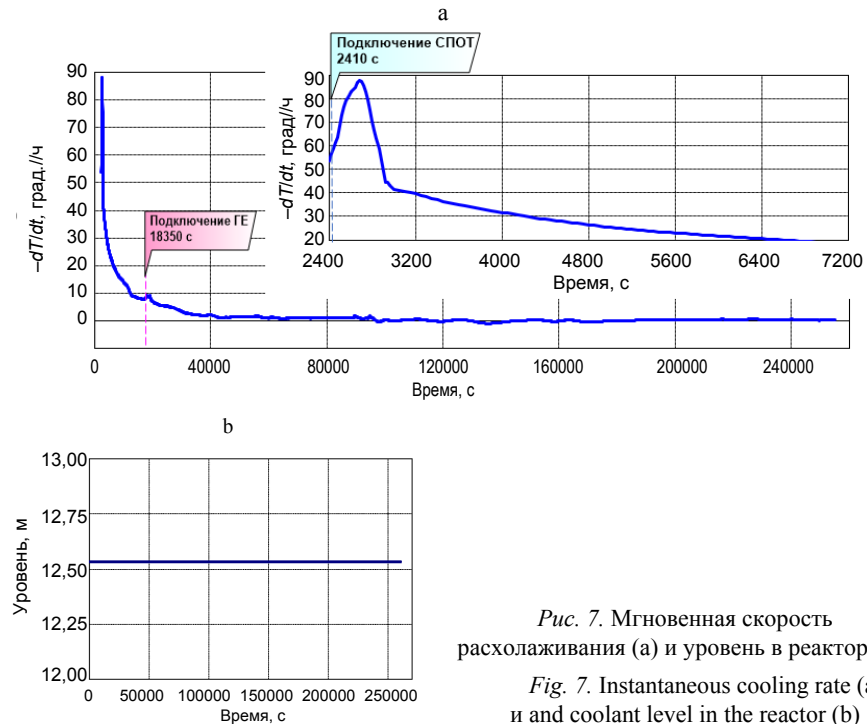


Рис. 7. Мгновенная скорость расхолаживания (а) и уровень в реакторе (b)

Fig. 7. Instantaneous cooling rate (a) and coolant level in the reactor (b)

Затем, после завершения переходных процессов и по мере снижения температурного напора между контурами, скорость расхолаживания быстро снижается и уже к 27 мин работы АТ СПОТ падает ниже 30 град/ч, а по истечении 1 ч 15 мин – ниже 20 град/ч. Таким образом, среднее значение скорости расхолаживания РУ за любые два часа работы АТ СПОТ не превышает 30 град/ч, что соответствует требованиям [16].

На всем протяжении аварийного процесса уровень теплоносителя первого контура в реакторе остается неизменным (рис. 7b). Паровая или парогазовая подушка в верхнем блоке реактора не формируется. Это обусловлено работой СПР КД со сбросом охлажденного теплоносителя первого контура под крышку реактора по линии аварийного газоудаления. Таким образом, отсутствует риск запаривания главного циркуляционного контура и срыва естественной циркуляции в нем и соответственно оголения обогреваемой части тепловыделяющих сборок в активной зоне не происходит.

При протекании аварии в условиях плотного первого контура состояние так называемого «жесткого контура» не наступает. В КД остается некоторая часть объема, заполненная изначально паром, в дальнейшем – парогазовой смесью, в состав которой входят и неконденсирующиеся газы из теплоносителя первого контура (рис. 8). Иными словами, угроза хрупкого разрушения основного оборудования первого контура и, в первую очередь, корпуса реактора при расхолаживании с помощью АТ СПОТ не возникает.

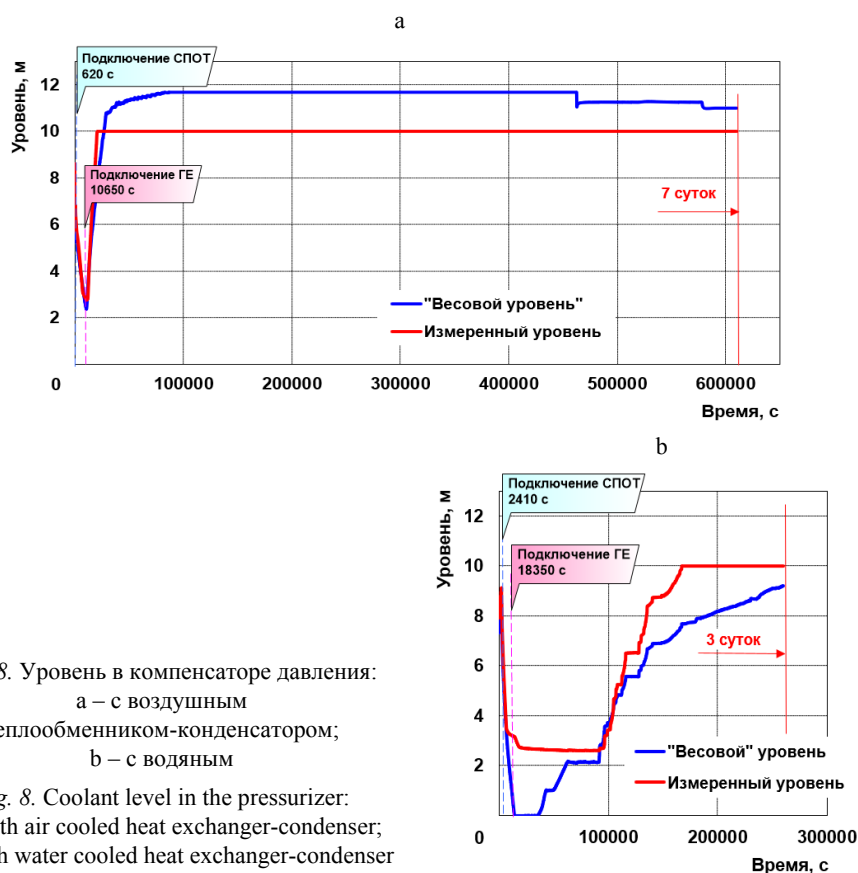


Рис. 8. Уровень в компенсаторе давления:  
а – с воздушным  
теплообменником-конденсатором;  
б – с водяным

Fig. 8. Coolant level in the pressurizer:  
а – with air cooled heat exchanger-condenser;  
b – with water cooled heat exchanger-condenser

Приведенные выше особенности конструкции АТ СПОТ, принцип ее действия и полученные расчетные характеристики аварийного теплоотвода подтверждают преимущества организации отвода остаточного тепловыделения от первого контура, минуя парогенератор, даже несмотря на то что АТ СПОТ предусматривает использование дополнительного оборудования – промежуточного термосифонного ТОАР в петле расхолаживания. Детальный анализ этих преимуществ представлен ниже в сравнении с соответствующими режимами функционирования известной схемы СПОТ ПГ.

### Преимущества автономной термосифонной СПОТ

Основными преимуществами АТ СПОТ являются эффективность теплоотвода от первого контура, надежность функционирования и безопасное состояние активной зоны на всем протяжении аварийного процесса.

При этом эффективность теплоотвода достигается реализацией процессов кипения и конденсации промежуточного теплоносителя на соответствующих участках сборки ДТС, формирующих теплопередающую поверхность ТОАР, а также использованием двухфазного промежуточного контура с аналогичными процессами кипения и конденсации теплоносителя промконтура. А поскольку теплоперенос в ДТС осуществляется передачей скрытой теплоты парообразования своего промежуточного теплоноси-

теля, термосифонное теплообменное оборудование имеет сравнительно высокую эффективную теплопроводность и изотермичность поверхности при низком внутреннем термическом сопротивлении [17, 18].

Сборка ординарных ДТС в ТОАР – это система достаточно большого количества параллельно включенных автономных замкнутых элементов теплопереноса с соответствующим запасом по теплообменной поверхности. Поэтому при аварийной разгерметизации даже нескольких ДТС весь теплообменник, а следовательно, и вся АТ СПОТ работоспособности не теряет, что обеспечивает надежность ее функционирования.

Надежное конструктивное разделение первого контура и промконтура повышает радиационную безопасность рассматриваемого аварийного процесса. Наличие между смежными контурами дополнительного промежуточного участка теплопереноса (сборки ординарных ДТС в ТОАР) формирует еще один промежуточный замкнутый участок между первым контуром и промконтуром. Подобное конструктивное решение получило название принципа тепловой мультибарьерной защиты, когда в направлении наиболее вероятного распространения радиоактивного загрязнения при возможных межконтурных течах добавляется еще один промежуточный замкнутый контур теплопереноса, выполняющий функции дополнительного барьера безопасности.

Кроме того, все промежуточные участки теплопереноса автономной термосифонной СПОТ располагаются внутри барьеров безопасности РУ, что соответственно снижает вероятность радиоактивного загрязнения при наложении аварии с течью первого контура.

В сравнении с традиционными кожухотрубными теплообменниками систем аварийного расхолаживания РУ надежность термосифонного ТОАР существенно выше. Независимость участков теплоподвода и теплоотвода в термосифонном ТОАР создает условия их свободного термического расширения, исключая опасные деформации всех остальных конструктивных элементов теплообменника и обеспечивая его целостность при резком набросе тепловой нагрузки. Это существенно повышает безаварийность теплоотвода от РУ, в первую очередь, при вводе АТ СПОТ в действие.

Продольное обтекание теплоносителем первого контура и промконтура в межтрубном пространстве термосифонного ТОАР обеспечивает относительно небольшое внешнее гидравлическое сопротивление всего теплообменника, что особенно важно для систем аварийного теплоотвода с естественной циркуляцией теплообмениваемых сред.

Габарит по высоте термосифонного ТОАР определяется длиной самих ДТС, и отсутствие подводящих и отводящих камер внешних теплоносителей, применяемых во всех традиционных кожухотрубных теплообменниках, дает еще одно существенное преимущество конструкции ТОАР с ДТС. При достаточно тесной компоновке основного оборудования и трубопроводов сложившейся схемы РУ с ВВЭР термосифонные ТОАР сравнительно легко вписываются в ее конфигурацию.

Наличие дополнительного изолированного по массе теплоносителя участка теплоотвода в виде сборки ДТС позволяет распределить параметры теплопереноса между последовательно расположенными контурами таким образом, что давление в промконтуре при вводе АТ СПОТ в действие (рис. 5) достигает в промконтуре величины не более 0,4–0,5 МПа (в ДТС при этом не более 1,75 МПа), а на этапе длительного установивше-

гося теплоотвода – менее 0,5 МПа. Для сравнения: при организации теплоотвода через второй контур давление в контуре СПОТ ПГ может достигать 8,0 МПа [19].

Функционирование АТ СПОТ не связано с состоянием основного оборудования РУ – парогенераторов и не зависит от их работоспособности. Функционирование же СПОТ ПГ полностью определяется состоянием и работоспособностью ПГ. В частности, при кипении первого контура из-за запаривания верхних рядов трубной системы ПГ ухудшаются условия ЕЦ первого контура, что приводит к постепенному неконтролируемому снижению отводимой от активной зоны тепловой мощности через ПГ [20].

Только одна функция безопасности (ФБ) – отвод теплоты по первому контуру – определяет функционирование АТ СПОТ, что обеспечивается запасом теплоносителя, достаточным для теплоотвода от активной зоны и теплопереноса к промконтуру с наличием устойчивой ЕЦ в петле расходолаживания между реактором и термосифонным ТОАР.

Функционирование же СПОТ ПГ зависит от выполнения четырех ФБ:

- 1) отвода теплоты от активной зоны по первому контуру;
- 2) поддержания запаса теплоносителя первого контура, достаточного для переноса теплоты в пределах первого контура от реактора к ПГ, что подразумевает отсутствие запаривания главных циркуляционных трубопроводов и образование гидрозатворов;
- 3) отвода теплоты по второму контуру (передачи теплоты в ПГ от первого контура к теплообменнику СПОТ ПГ, что требует наличия достаточного запаса котловой воды в ПГ);
- 4) управления давлением второго контура (для ввода в работу СПОТ ПГ).

При этом функционирование СПОТ ПГ обеспечивается только совместным выполнением всех четырех ФБ.

Как и СПОТ ПГ, схемное решение АТ СПОТ предусматривает возможность отвода теплоты к конечному поглотителю: к выкипающей воде в БАОТ и непосредственно к атмосферному воздуху. И здесь АТ СПОТ имеет свои преимущества.

При воздушном охлаждении теплообменника-конденсатора преимуществом АТ СПОТ является то, что протекание аварийного процесса не требует регулирования отводимой от РУ тепловой мощности. Отводимая термосифонными ТОАР тепловая мощность, с одной стороны, зависит от уровня остаточного тепловыделения в активной зоне, с другой – от интенсивности теплопереноса в промконтуре. Низкие параметры в промконтуре (пиковое избыточное 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 «первый контур – испарители ДТС» исключает необходимость регулирования (ограничения) отводимой от РУ мощности. Таким образом, в АТ СПОТ интенсивность теплоотвода определяется и одновременно ограничивается участком «первый контур – ДТС – промконтур». Условия же работы участка «промконтур – ТК – конечный поглотитель» практически не отличаются от условий работы схемы СПОТ ПГ, но уже без необходимости в регулировании теплоотвода.

При отводе теплоты от ТК к атмосферному воздуху, а также в варианте с теплоотводом к выкипающей в БАОТ воде преимущество АТ СПОТ заключается в сохранении запаса теплоносителя второго контура в ПГ.

Для обеспечения теплоотвода от первого контура средствами АТ СПОТ не требуется снижения параметров второго контура с целью достижения необходимого температурного напора. Поэтому из ПГ, не участвующего в аварийном теплоотводе, не нужно сбрасывать пар в окружающее пространство, как это реализуется в СПОТ ПГ (так называемый режим «регулирования» [21]). Это предотвращает оголение (даже частичное) 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 активной зоны через второй контур в течение еще почти суток (рис. 3b и 4b).

СПОТ Р, функционируя вместе с СПР КД, обеспечивает эффективный теплоотвод от РУ. После ввода СПОТ Р в действие, благодаря одновременному расхолаживанию компенсатора с помощью СПР КД, формируются условия для надежного срабатывания ГЕ САОЗ с одновременным сохранением достаточного запаса до кипения теплоносителя первого контура. Впрыск борного концентрата от ГЕ САОЗ предотвращает выход РУ на повторную критичность за счет ввода положительной реактивности при снижении температуры теплоносителя первого контура. Подобный метод позволяет исключить необходимость увеличения эффективности органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) либо установки дополнительных систем, воздействующих на реактивность [14]. Следовательно, отпадает необходимость в увеличении эффективности ОР СУЗ или применении дополнительных систем, обеспечивающих подкритичность. К примеру, в проекте АЭС-2006 с ВВЭР-1200 по сравнению с ВВЭР-1000/В-320 количество СУЗ было увеличено с 61 до 121 [22].

Важным преимуществом применения АТ СПОТ для аварийного теплоотвода при полном длительном обесточивании РУ в условиях наложения малой течи первого контура является возможность существенного, как минимум на порядок, увеличения продолжительности периода времени до начала плавления активной зоны [14].

Схемное решение АТ СПОТ обеспечивает расхолаживание не только реактора, но и парогенераторов, что позволяет при аварии с обесточиванием сохранить запас химобессоленной воды второго контура и исключить необходимость в восполнении этого запаса для последующего ввода РУ в действие.

В зимний период постоянная продувка первого контура через ТОАР СПОТ Р гарантирует пассивную тепловую защиту воды в БАОТ от замерзания в условиях низкой температуры окружающего воздуха. Это исключает необходимость использования дополнительных общестанционных систем для тепловой защиты БАОТ [13].

## ВЫВОДЫ

Использование автономных термосифонных СПОТ в составе систем безопасности эволюционных РУ с ВВЭР является важным шагом на пути повышения безопасности РУ в условиях возможных запроектных аварий с полным длительным обесточиванием. Организация отвода остаточного тепловыделения от первого контура РУ с помощью АТ СПОТ имеет целый ряд преимуществ.

1. Применение в СПОТ теплообменного оборудования на основе ДТС, формирующих надежное конструктивное разделение первого контура и промконтура, позволит обеспечить безопасный и в то же время эффективный теплоотвод, снизить риск распространения радиоактивных загрязнений за пределы барьеров безопасности при межконтурных течах. Это обеспечит не только сохранение активной зоны и всей РУ в работоспособном состоянии при аварии с полным длительным обесточиванием, но и сможет гарантировать радиационную безопасность, надежно предохраняя окружающую среду от возможного выброса радиоактивных загрязнений.

2. СПОТ на основе ДТС отличается простотой конструкции, не нуждается в обслуживании в процессе эксплуатации.

3. Термосифонные ТОАР имеют приемлемые массогабаритные характеристики.

4. АТ СПОТ обеспечивает необходимые условия для ЕЦ первого контура на всех этапах аварийного теплоотвода.

5. Теплоотвод в ДТС за счет переноса скрытой теплоты парообразования своего промежуточного теплоносителя и использование только массовых сил для его транспортировки служат гарантией надежного и эффективного теплоотвода в необходимом диапазоне эксплуатационных параметров.

6. Для работы АТ СПОТ достаточно сохранения лишь одной ФБ – отвода теплоты по первому контуру, что минимизирует требования к состоянию РУ в аварийных условиях: необходим только минимальный запас теплоносителя первого контура в реакторе для надежного теплоотвода от активной зоны.

7. Для начала функционирования АТ СПОТ достаточно лишь факта обесточивания. Ввод в действие системы и начало процесса расхолаживания совершаются в один этап. Исключается необходимость в дополнительном этапе регулирования с потерей части второго контура через быстродействующую редуцирующую установку со сбросом пара в атмосферу.

8. На всем этапе аварийного процесса АТ СПОТ обеспечивает сохранение достаточного запаса до кипения в активной зоне и поддерживает безопасное значение температуры оболочек ТВЭЛ.

9. В процессе аварийного теплоотвода не требуется регулирование отводимой АТ СПОТ тепловой мощности, уровень которой определяется и одновременно ограничивается условиями теплопереноса на участках «первый контур – ДТС – промконтур». Низкие параметры в промконтуре являются естественным ограничивающим фактором для теплоотвода от первого контура, что в сочетании с относительно высоким термическим сопротивлением участка «первый контур – испарители ДТС» исключает необходимость регулирования (ограничения) отводимой от РУ мощности.

10. Поддержание подкритичности активной зоны при функционировании АТ СПОТ обеспечивается только за счет пассивных систем безопасности. Совместная работа СПОТ Р и СПР КД обеспечивает эффективное снижение давления в первом контуре и своевременное срабатывание ГЕ САОЗ с вводом жидкого поглотителя в первый контур. Это исключает достижение повторной критичности при расхолаживании РУ. При этом отпадает необходимость в увеличении эффективности ОР СУЗ или применении дополнительных систем, обеспечивающих подкритичность.

11. При полном длительном обесточивании с наложением малой течи первого контура – существенное, как минимум на порядок, увеличение времени до начала плавления активной зоны.

12. АТ СПОТ обеспечивает расхолаживание не только реактора, но и парогенераторов, что позволяет в аварийных условиях сохранить запас химобессоленной воды второго контура и исключить необходимость в восполнении этого запаса для последующего ввода РУ в действие.

Полученные результаты расчетного моделирования аварийного отвода остаточного тепловыделения с помощью АТ СПОТ позволяют сделать вывод о возможности ее эффективного применения для эволюционных РУ АЭС с ВВЭР. Разработка и внедрение АТ СПОТ являются шагом на пути диверсификации пассивных систем безопасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Букринский, А. М. Безопасность атомных станций по федеральным нормам и правилам России и стандартам МАГАТЭ. Сравнение основных принципов и требований по обеспечению безопасности / А. М. Букринский. 3-е изд. М.: НТЦ ЯРБ, 2019. 196 с.
2. Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР / С. М. Дмитриев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 2. С. 151–162. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>.
3. Сорокин, В. В. Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР / В. В. Сорокин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 1. С. 67–75. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-67-75>.
4. Пути совершенствования системы пассивного охлаждения активной зоны реактора ВВЭР / А. В. Морозов [и др.] // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса», Саратов, 30 октября – 1 ноября 2018 г. Саратов, 2018. С. 115–120.
5. Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants [Electronic Resource]. IAEA-TECDOC-1624. Vienna: IAEA, 2009. Mode of access: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1624\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1624_web.pdf). Date of access: 07.01.2022.
6. Natural circulation in water cooled nuclear power plants: Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments [Electronic Resource]. IAEA-TECDOC-1474. Vienna: IAEA, 2005. Mode of access: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE\\_1474\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf). Date of access: 05.01.2022.
7. Sierchulą, J. Analysis of passive residual heat removal system in AP1000 nuclear power plant / J. Sierchulą // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 214. Art. ID 012095. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012095>.
8. Design, Experiment, and Commissioning of the Passive Residual Heat Removal System of China's Generation III Nuclear Power HPR1000 / Feng Li [et al.] // Science and Technology of Nuclear Installations. 2021. 6 p. <https://doi.org/10.1155/2021/6680400>.
9. Дан, П. Д. Тепловые трубы / П. Д. Дан, Д. А. Рей; пер. с англ. Ю. А. Зейгарник. М.: Энергия, 1979. 272 с.
10. Чи, С. Тепловые трубы: Теория и практика / С. Чи; пер. с англ. В. Я. Сидоров. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
11. Гершуні, О. Н. Випаровувально-конденсатційні системи теплопередачі для ядерних енергетичних технологій / О. Н. Гершуні, О. П. Ніщик, Є. М. Письменний. Київ: Альтерпрес, 2007. 236 с.
12. Chapter 1 – Natural circulation loops – advantages, challenges, and classification –/ P. K. Vijayan, A. K. Nayak, N. Kumar // Single-Phase, Two-Phase and Supercritical Natural Circulation Systems. Woodhead Publishing, 2019. P. 1–30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102486-7.00001-9>.

13. Passive Residual Heat Removal System for WVER with the Thermosiphon Heatexchange Equipment / I. I. Sviridenko [et al.] // *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2015. Vol. 16. N 1-4. P. 209–223. <https://doi.org/10.1615/InterJenerCleanEnv.2015015683>
14. Свириденко, И. И. Расчетные исследования аварийного теплоотвода ВВЭР автономной термосифонной СПОТ первого контура / И. И. Свириденко, Д. В. Шевелев, В. В. Свердлов // *Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: науч.-тех. сб. Сосновый Бор: ФГУП НИТИ*, 2018. Вып. 3 (13). С. 28–41.
15. Свириденко И. И. Удержание реактора в подкритическом состоянии при запроектной аварии одновременным расхолаживанием и декомпрессией первого контура / И. И. Свириденко // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2019. № 1. С. 85–96. <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.08>
16. Инструкция по ликвидации аварий и аварийных ситуаций на реакторной установке энергоблока № 5 Запорожской АЭС. 05.ГТ.00.ИЭ.11. ОП «Запорожская АЭС», 2017. 444 с.
17. Васильев, Л. Л. Теплообменники на тепловых трубах / Л. Л. Васильев. Минск: Наука и техника, 1981. 143 с.
18. Безродный, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк. К.: Факт, 2005. 704 с.
19. АЭС «Куданкулам». Классификация систем, оборудования, трубопроводов и элементов теплотехнической части. КК.UJA.0.SR.PZ.PR004. Институт «Атомэнергoproject», 2002.
20. Концепция расширенного использования естественной циркуляции теплоносителя первого контура в энергоблоках с ВВЭР-1000 (1200) и перспективы ее реализации / А. Я. Благовещенский [и др.] // *Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: Материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23–25 мая 2012 г. М.: Концерн «Росэнергоатом», 2012. С. 602–605.*
21. Влияние пассивных систем на протекание типичных запроектных аварий РУ В-392 [Электронный ресурс] / Н. В. Букин [и др.] // *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы 2-й науч.-техн. конф., Подольск, 19–23 ноября 2001 г. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report1/vpsnptza.pdf>. Дата доступа: 17.09.2021.*
22. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С. А. Андрущенко [и др.]. М.: Логос, 2010. 603 с.

Поступила 17.01.2023    Подписана в печать 28.03.2023    Опубликована онлайн 29.09.2023

#### REFERENCES

1. Bukrinskii A. M. (2019) *Safety of Nuclear Power Plants According to Federal Norms and Regulations of Russia and IAEA Standards. Comparison of Basic Principles and Requirements for Ensuring Safety*. Third Edition. Moscow, STC NRS. 196 (in Russian).
2. Dmitriev S. M., Gerasimov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. (2020) Investigation of Coolant Local Hydrodynamics in the Mixed Core of the VVER Reactor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (2), 151–162. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162> (in Russian).
3. Sorokin V. V. (2022) Calculation of Start-Up Time of Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of Localization Safety System of a Nuclear Power Plant Equipped with VVER. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (1), 67–75. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-67-75> (in Russian).
4. Morozov A. V., Ragulin S. V., Sahipgareev A. R., Shlepkin A. S. (2018) Ways to Improve the Passive Cooling System of the VVER Reactor Core. *Problemy Sovershenstvovaniya Toplivno-Energeticheskogo Kompleksa. Materialy XIV Mezhdunarodnoi Nauch.-Tehn. Konf., Saratov, 30 Oktyabrya – 1 Noyabrya 2018 g.* [Materials of the XIV International Scientific and Technical Conference “Problems of Improving the Fuel and Energy Complex”]. Saratov, 115–120 (in Russian).
5. IAEA (2009) *Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1624*. Vienna. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1624\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1624_web.pdf) (accessed 07 January 2022).

6. IAEA (2005) *Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants: Phenomena, Models, and Methodology for System Reliability Assessments*. IAEA-TECDOC-1474. Vienna. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE\\_1474\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf) (accessed 05 January 2022).
7. Sierchula J. (2019) Analysis of Passive Residual Heat Removal System in AP1000 Nuclear Power Plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214, 012095 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012095>.
8. Li F., Lu Y., Chu X., Zheng Q., Wu G. (2021) Design, Experiment, and Commissioning of the Passive Residual Heat Removal System of China's Generation III Nuclear Power HPR1000. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2021, 6680400. <https://doi.org/10.1155/2021/6680400>.
9. Dunn P. D., Reay D. A. (1982) *Heat Pipes*. Elsevier Science & Technology Books.
10. Chi S. W. (1976) *Heat Pipes: Theory and Practice*. Hemisphere Pub. Corp.
11. Gershuni O. N., Nishchik O. P., Pishmenyi E. M. (2007) *Evaporation-Condensation Heat Transfer Systems for Nuclear Energy Technologies*. Kyiv, Al'terpres Publ. 236 (in Ukrainian).
12. Vijayan P. K., Nayak A. K., Kumar N. (2019). Chapter 1 – Natural Circulation Loops – Advantages, Challenges, and Classification. *Single-Phase, Two-Phase and Supercritical Natural Circulation Systems*. Woodhead Publishing, 1–30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102486-7.00001-9>.
13. Sviridenko I. I., Shevelyov D. V., Polyakov O. V., Timofeev V. A., Sviridenko N. N. (2015) Passive Residual Heat Removal System for WWER with the Thermosiphon Heat Exchange Equipment. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 16 (1–4), 209–223. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2015015683>.
14. Sviridenko I. I., Shevelev D. V., Sverdlov V. V. (2018) Analytical Researches of Emergency Heat Removal from VVER by Autonomous Thermosiphon PRHRS of Primary Circuit. *Tehnologii Obespecheniya Zhiznennogo Tsikla Yadernyh Energeticheskikh Ustanovok: Nauch.-Tehn. Sbornik = Nuclear Propulsion Reactor Plants. Life Cycle Management Technologies. Collection of Scientific and Technical Papers*. Sosnovy Bor: FSUE "Alexandrov NITI", Iss. 3(13), 28–41 (in Russian).
15. Sviridenko I. I. (2019) Assuring Reactor's Subcriticality Following Beyond Design Accident by Simultaneous Cool Down and Depressurization. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*, (1), 85–96 (in Russian). <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.08>.
16. Zaporozhye NPP (2017) *Instructions for the Elimination of Accidents and Emergencies at the Reactor Plant of Power Unit No 5 of the Zaporozhye NPP*. 05.ITT.00.II.11 (in Russian).
17. Vasiliev L. L. (1981) *Heat Exchangers on Heat Pipes*. Minsk, Nauka i Tehnika Publ. 143 (in Russian).
18. Bezrodnii M. K., Pioro I. L., Kostyuk T. O. (2005) *Transfer Processes in Two-Phase Thermosiphon Systems. Theory and Practice*. Kyiv, Fakt Publ. 704 (in Russian).
19. Atomenergoproekt (2002) *Kudankulam NPP. Classification of Systems, Equipment, Pipelines and Elements of the Heat Engineering Division*. KK.UJA.0.SR.PZ.PR004 (in Russian).
20. Blagoveshchenskii A. Ya., Bor S. M., Konovich M. N., Mityukov V. N., Bezlepin V. V., Kukhtevich V. O., Mitryukhin A. G. [et al.] (2012) The Concept of Expanded Use of Natural Circulation of the Primary Coolant in Power Units with VVER-1000 (1200) and Prospects for its Implementation. *Bezopasnost', Effektivnost' i Ekonomika Atomnoi Energetiki: Materialy 8 Mezhdunar. Nauch.-Tehn. Konf., Moskva, 23–25 Maja 2012 g.* [Safety, Efficiency and Economy of Nuclear Energy: Proceedings of the 8<sup>th</sup> Intern. Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, Rosenergoatom Concern, 602–605 (in Russian).
21. Bukin N. V., Borisov L. N., Gromov A. L., Fil N. S., Shumskii A. M. (2001) Influence of Passive Systems on the Course of Typical Beyond Design Basis Accidents of V-392 Reactor Plant. *Obespechenie Bezopasnosti AES s VVER: Materialy 2 Nauch.-Tehn. Konf., Podol'sk, 19–23 Noyabrya 2001 g.* [Ensuring the Safety of VVER NPP: Proceedings of the 2nd Sci.-Tech Conf.]. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report1/vpsnptza.pdf> (accessed 17 September 2021) (in Russian).
22. Andrushechko S. A., Afrov A. M., Vasiliev B. Yu., Generalov V. N., Kosourov K. B., Semchenkov Yu. M., Ukraintsev V. F. (2010) *NPP with a VVER-1000 Reactor. From the Physical Fundamentals of Operation to the Evolution of the Project*. Moscow, Logos Publ. 603 (in Russian).

Received: 17 January 2022

Accepted: 28 March 2023

Published online: 29 September 2023