

# ОПЫТ ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ В-392М

**К.Ф. Галиев, С.В. Яуров, Е.В. Гончаров, А.С. Вольнов**

*Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»  
396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1*



Рассматриваются особенности конструкции оборудования системы пассивного отвода тепла (СПОТ), впервые применяемой в России на реакторе ВВЭР-1200. Описываются конструктивные недостатки воздушных затворов и регулирующих устройств системы, выявленные в процессе пусконаладочных работ и препятствующие выполнению системой проектных функций. Недостатки связаны с непредсказуемым влиянием термодинамических процессов рабочей среды на подвижные элементы оборудования. Недостатки оборудования были устранены установкой дополнительных узлов фиксации оборудования, срабатывающих после ввода системы в работу, и дополнительной настройкой элементов. Устройство фиксации позволяет воздушным затворам находиться строго в открытом положении и не допускает неконтролируемое закрытие под воздействием стремительно восходящего потока горячего воздуха в кожухе СПОТ.

На этапе ввода в эксплуатацию энергоблока № 1 НВАЭС-2 после доработки конструкции оборудования СПОТ подтвердила свою незаменимость в качестве средства отвода тепла от реактора в условиях непредвиденного срабатывания аварийной защиты реактора, а также доказала свою эффективность при комплексном опробовании СПОТ на мощности реакторной установки 75%. Общая мощность теплоотведения теплообменников СПОТ составила более 100 МВт при температуре окружающего воздуха  $-13^{\circ}\text{C}$ , время выхода СПОТ на мощность не превысила 90 с, что соответствует проектным характеристикам системы.

**Ключевые слова:** проект АЭС-2006, В-392М, ВВЭР-1200, система пассивного отвода тепла, воздушный затвор, регулирующее устройство, пусконаладочные работы.

## ВВЕДЕНИЕ

Система пассивного отвода тепла (СПОТ) в данной компоновке впервые применяется в проекте АЭС-2006 и является защитной системой безопасности, основанной на пассивном принципе действия, обеспечивающей отвод остаточных тепловыделений от активной зоны реактора через второй контур [1, 2]. Уникальность системы и отсутствие опыта ее эксплуатации отразились на конструктивном несовершенстве оборудования, причиной чего явилось отсутствие анализа работы оборудования в условиях эксплуатационных температур и динамики рабочей среды. Полномасштабная проверка функци-

© К.Ф. Галиев, С.В. Яуров, Е.В. Гончаров, А.С. Вольнов, 2017

онирования СПОТ была осуществлена в процессе пусконаладочных работ, и на данном этапе был выявлен ряд дефектов оборудования, препятствующих выполнению СПОТ проектных функций.

### НАЗНАЧЕНИЕ И СОСТАВ СПОТ

СПОТ выполняет заданные функции при проектных и запроектных авариях, приводящих к необходимости пассивного отвода тепла от реакторной установки для поддержания ее в безопасном состоянии, обеспечивая поддержание и контроль основных критических функций безопасности на АЭС [3].

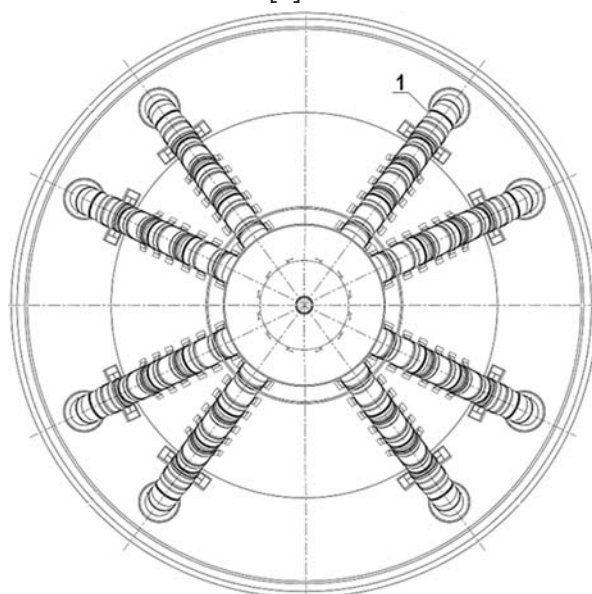


Рис. 1. Воздуховоды СПОТ (вид сверху на реакторное здание): 1 – воздуховод СПОТ

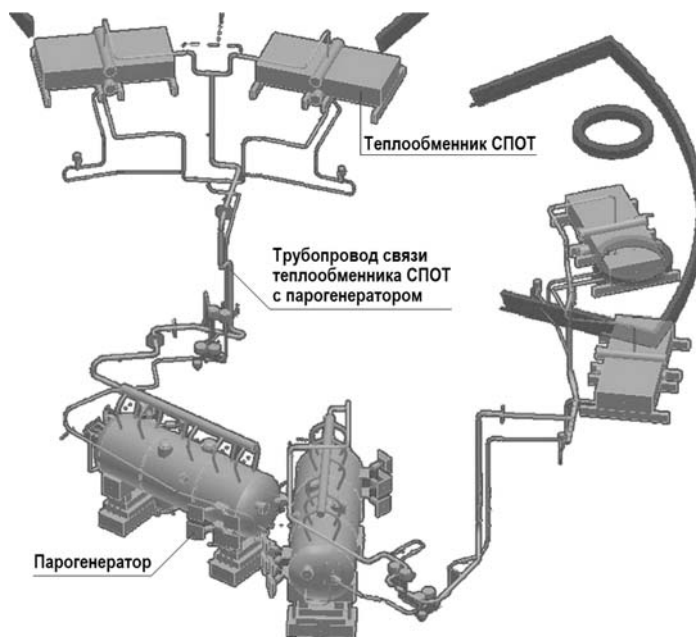


Рис. 2. Трубопровод связи теплообменника СПОТ и парогенератора

СПОТ имеет четыре независимых контура по два теплообменных модуля с воздуховодами (рис. 1). Согласно принятым проектным характеристикам оборудования, трех работоспособных контуров циркуляции достаточно для осуществления системой функций в полном объеме в любом режиме работы.

СПОТ обеспечивает непрерывный отвод остаточных тепловыделений при авариях, протекающих с отказом каналов системы аварийного расхолаживания парогенераторов (активной системы безопасности) при наличии нормального или аварийного электропитания, при запроектных авариях с потерей всех источников электроснабжения переменного тока. При этом, в соответствии с проектом, СПОТ вступает в работу через 30 секунд после потери всех источников электроснабжения переменного тока. Теплообменники СПОТ соединены с парогенераторами непосредственно трубопроводом (рис. 2) и находятся в режиме ожидания под параметрами парогенераторов.

Основными элементами СПОТ [4] являются трубопроводы пароконденсатного тракта с арматурой (см. рис. 2), воздуховоды, теплообменные модули.

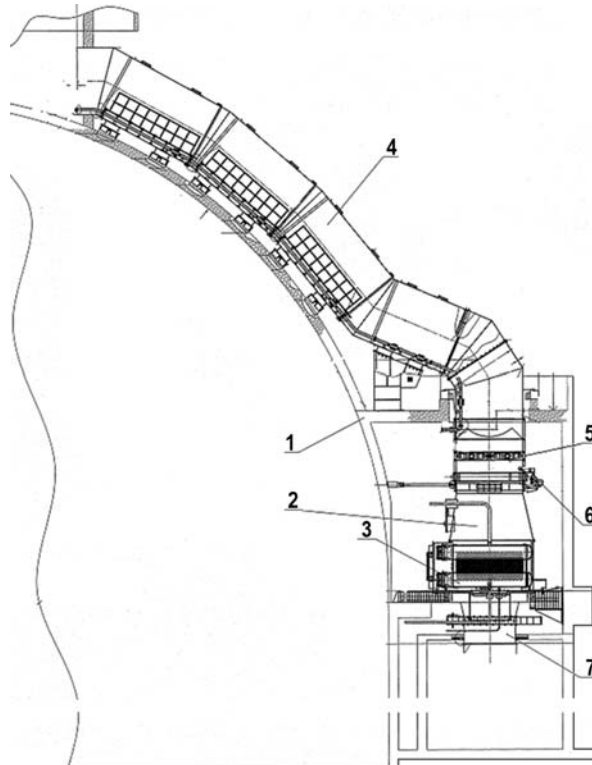


Рис. 3. Оборудование контура СПОТ: 1 – реакторное здание; 2 – кожух теплообменного модуля; 3 – теплообменник; 4 – воздуховод; 5 – затвор воздушный (верхний); 6 – регулирующее устройство; 7 – затвор воздушный (нижний)

В состав каждого теплообменного модуля входят (рис. 3)

- затворы воздушные (на входе и на выходе модуля);
- теплообменник;
- регулирующее устройство с приводом пассивного действия;
- кожух теплообменного модуля.

Воздуховод предназначен для транспортировки нагретого воздуха от теплообменников СПОТ к выходному коллектору и представляет собой сборно-разборную конструкцию, выполненную из отдельных звеньев и покрытых с внешней стороны теплоизоляцией.

Кожух теплообменного модуля предназначен для организации потока воздуха через теплообменник СПОТ и уменьшения тепловых потерь в помещениях, в которых распола-

гаются теплообменные модули. Кожух теплообменного модуля представляет собой сборно-разборную конструкцию, выполненную из металлических листов и покрытую с внешней стороны теплоизоляцией.

При работе системы в теплообменнике СПОТ за счет его охлаждения атмосферным воздухом происходит конденсация пара, поступающего из парогенератора.

Воздушные затворы установлены на входе в теплообменный модуль перед теплообменником и после него на выходе. Затворы предназначены для обеспечения герметичности и теплоизоляции теплообменника, находящегося в режиме ожидания при нормальных условиях эксплуатации реакторной установки (РУ). Верхний и нижний затворы оснащены электромагнитами, удерживающими их в закрытом состоянии.

Регулирующее устройство оснащено двумя приводами: приводом пассивного принципа действия и дублирующим приводом активного действия. Приводы активного действия имеют электропитание от системы аварийного электроснабжения первой категории, которое обеспечивает оператору возможность управления регулирующим устройством. Функционирование регулирующего устройства обеспечивается посредством привода пассивного действия от рабочей среды второго контура.

Привод пассивного принципа действия регулирующего устройства предназначен для длительной работы во время аварии. Привод представляет собой поршневой механизм с возвратной пружиной. Перемещение штока поршня (и дальнейший поворот шибера регулирующего устройства) осуществляется под действием давления пара на поршень с одной стороны и пружины – с другой. Направление движения штока и, следовательно, открытие или закрытие регулирующего устройства зависят от соотношения сил, создаваемых пружиной и давлением пара на поршень.

В режиме нормальной эксплуатации функционирование системы не требуется, и СПОТ находится в режиме ожидания. В этом режиме воздушные затворы находятся в закрытом состоянии, а положение регулирующего устройства определяется величиной давления в соответствующем парогенераторе [5]. В аварийных ситуациях проект СПОТ предусматривает два режима работы системы:

- поддержание давления в ПГ в пределах 5,8 – 6,75 МПа;
- расхолаживание РУ.

При возникновении исходного события СПОТ автоматически вступает в работу, воздушные затворы открываются, теплообменники выходят на проектную мощность, регулирующее устройство обеспечивает поддержание давления во втором контуре в пределах от 5,8 до 6,75 МПа. Перевод регулирующего устройства в режим расхолаживания РУ осуществляется оперативным персоналом БПУ путем включения электропривода на регулирующем устройстве, при этом открытие регулирующего устройства происходит независимо от положения привода пассивного действия. Перевод в режим поддержания давления в ПГ происходит переводом электропривода в исходное состояние. Проектная тепловая мощность одного теплообменника СПОТ составляет 8 МВт и снижается с уменьшением давления в парогенераторе (по мере расхолаживания РУ).

### **ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ НА РАБОТУ ВОЗДУШНЫХ ЗАТВОРОВ СПОТ**

В процессе испытаний СПОТ на этапе холодно-горячей обкатки РУ энергоблока № 1 НВАЭС-2 был выявлен недостаток воздушных затворов (рис. 4): при разогретых до 90 – 120°C теплообменниках СПОТ после открытия всех воздушных затворов верхние затворы, попадая под мощные потоки горячего воздуха, совершали неконтролируемые вращения вокруг своей оси [6]. Ограничителем таких вращений служили элементы конструкций затворов и рам. При ударах произошли повреждения элементов, удерживающих затвор в закрытом положении, и толкателей конечных выключателей, в результате чего могло произойти повреждение уплотняющей поверхности затвора.

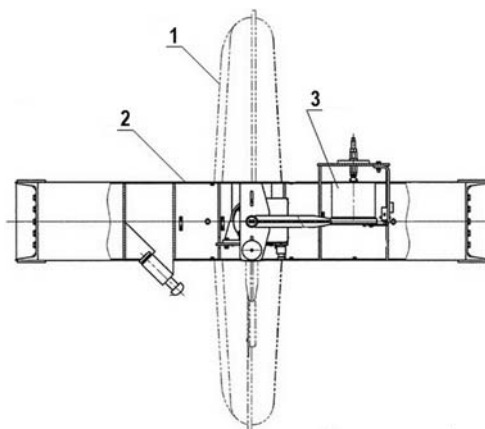


Рис. 4. Воздушный затвор СПОТ. Изначальная конструкция (вид сбоку): 1 – шибер затвора; 2 – рама затвора; 3 – электромагнит, удерживающий шибер в закрытом положении

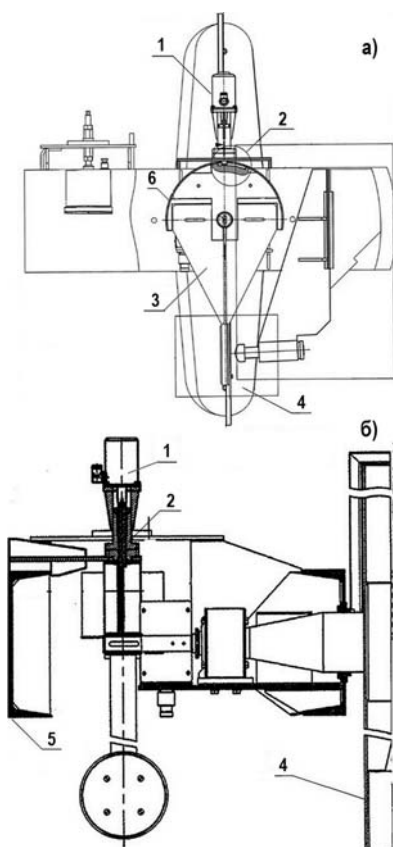


Рис. 5. Модифицированный воздушный затвор СПОТ после установки устройства фиксации в открытом положении: 1 – электромагнит фиксирующего устройства (доработка); 2 – защелка фиксирующего устройства (доработка); 3 – рычаг; 4 – шибер; 5 – рама; 6 – дуга с отверстием под защелку. а) вид сбоку; б) вид спереди (фиксирующее устройство)

В рамках устранения данного несоответствия конструктор разработал устройство, фиксирующее затворы в открытом положении (рис. 5). Устройство представляет собой защелку или цилиндр и электромагнит. На валу подвижной части затвора выполнена конструкция в виде сектора с направляющей дугой, в которой имеется отверстие. В процессе открытия затвора дуга проворачивается относительно защелки до тех пор, пока защелка не вой-

дет в отверстие дуги, тем самым фиксируя затвор от вращения (в открытом состоянии). При закрытии затвора электромагнит вытягивает защелку из отверстия дуги в момент подачи команды дистанционного закрытия затвора и включения электропривода. Таким образом обеспечивается полная автоматизация управления воздушными затворами.

При проведении пусконаладочных работ выявлены недостатки в работе воздушных затворов, препятствующие их функционированию [7], что обусловлено их конструкцией, а также местными природными факторами (низкие температуры в зимний период). Металл рамы и шибера затвора, с одной стороны, прогреваются до 300°C (параметры среды в табл. 1), а с другой стороны, охлаждены до 25°C летом (-25°C зимой). За счет перепада температур происходит деформация основного металла воздушных затворов и кожухов, что приводит к неоткрытию (незакрытию) затворов.

Таблица 1

**Технические характеристики теплообменника СПОТ [1]**

Количество .....	8 шт.
Тепловая мощность каждого .....	не менее 8 МВт
Рабочая среда в трубках .....	пар, конденсат
Рабочая среда в межтрубном пространстве .....	воздух
Давление расчетное по паровому и конденсатному тракту .....	8,1 МПа
Температура пара .....	300°C
Температура конденсата .....	300°C
Температура воздуха на входе в теплообменник .....	38°C
Температура воздуха на выходе из теплообменника .....	300°C
Масса без рабочей среды .....	38,5 т

Воздействие данного недочета на работу затворов минимизировано путем многократной регулировки механизмов затворов и рихтовкой элементов кожуха СПОТ в летний период, а затем в зимний период.

Для применения СПОТ аналогичной конструкции на российских АЭС следует усовершенствовать конструкцию кожухов и затворов с учетом природных факторов, увеличивая зазоры между подвижными элементами оборудования для исключения их касания между собой.

**ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

На этапе холодно-горячей обкатки реакторной установки энергоблока № 1 НВАЭС-2 до перехода на «горячую» фазу была выполнена настройка пассивного привода регулирующих устройств СПОТ с выставлением диапазона регулирования от 5,8 МПа (регулирующее устройство полностью закрыто) до 6,75 МПа (полностью открыто), что полностью соответствовало установленному проектом диапазону регулирования давления второго контура [8]. Температура возвратной пружины (рис. 6) составляла примерно 20°C.

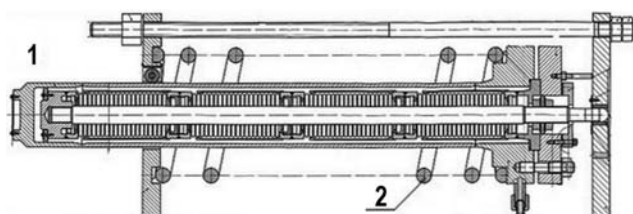


Рис. 6. Фрагмент регулирующего устройства СПОТ: 1 – поршневой механизм пассивного привода; 2 – возвратная пружина

Спустя шесть месяцев в условиях нахождения реакторной установки в горячем состоянии на этапе опытно-промышленной эксплуатации было выявлено, что диапазон

регулирования не соответствует проектному: полное закрытие регулирующих устройств происходит только при снижении давления во втором контуре до 5,2 МПа [9]. После привлечения завода-изготовителя и попытки увеличить давление закрытия регулирующего устройства путем поджатия пружины поршневого механизма до проектных 5,8 МПа увеличивается и давление полного открытия выше 6,8 МПа.

Возможность отдельной настройки давления закрытия и давления открытия отсутствует, а весь диапазон регулирования задается физическими свойствами одной пружины. Таким образом, наиболее вероятной причиной изменения диапазона регулирования является изменение характеристик металла пружины в результате ее нагрева (до температуры более 70°C).

В результате заниженного давления закрытия регулирующего устройства при необходимости поддержания давления второго контура при помощи СПОТ будет происходить неконтролируемое захлаживание парогенераторов.

### **ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ЭТАПЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

Дефекты и недоработки конструкций оборудования СПОТ были допущены вследствие упущений в процессе стендовых испытаний оборудования на заводе-изготовителе. В заводских условиях возможность нагрева на стенде элементов оборудования, которые будут подвержены нагреву в условиях эксплуатации, технически обеспечить возможно, однако осуществляется данная практика далеко не всегда. Обеспечение стендовых испытаний крупногабаритного оборудования в условиях динамики восходящего потока горячего воздуха реализовать весьма затруднительно. В этом случае необходимо подробное исследование работы оборудования с применением компьютерной модели, максимально приближенной к реальным условиям. Следует отметить, что оборудование СПОТ не в полном объеме подвергалось стендовым испытаниям в условиях расчетной температуры. Влияние воздушной динамики на воздушные затворы СПОТ в режиме расхолаживания также не учитывалось на этапе разработки технического и рабочего проектов. Стендовые испытания затворов с использованием потоков воздуха не проводились.

Указанные допущения при разработке проекта систем, в частности, систем безопасности, могут привести к невыполнению функции безопасности и дальнейшим катастрофическим последствиям. В связи с этим стоит обратить внимание конструкторских организаций на применение компьютерных моделей с возможностью учета максимального количества эксплуатационных параметров оборудования и системы в целом, а также моделирования функций оборудования в условиях динамики окружающей среды. Заводу-изготовителю следует применять стенды с параметрами, наиболее приближенными к условиям эксплуатации. Данные мероприятия способствуют сокращению финансовых и трудовых затрат при производстве, транспортировке, наладке гарантийного оборудования, а также на демонтаж и утилизацию некондиционного оборудования.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Система пассивного отвода тепла, примененная в проекте реакторной установки В-392М, в данной компоновке используется впервые. Ввиду уникальности оборудования исходная конструкция имела ряд недостатков, препятствующих проектному функционированию системы, и в процессе пусконаладочных работ потребовалась установка дополнительных узлов, например, устройства фиксации воздушных затворов в открытом положении. Устройство фиксации позволяет воздушным затворам находиться строго в открытом положении, не допуская неконтролируемого закрытия под воздействием стремительно восходящего потока горячего воздуха в кожухе СПОТ.

Кроме того, в процессе наладки оборудования СПОТ подвижным элементам системы требовалась многократная настройка в холодном и горячем состоянии, а также в лет-

ний и зимний периоды.

На этапе ввода в эксплуатацию энергоблока № 1 НВАЭС-2 после доработки конструкции оборудования СПОТ подтвердила свою незаменимость в качестве средства отвода тепла от реактора в условиях непредвиденного срабатывания аварийной защиты, а также доказала эффективность при комплексном опробовании ее на мощности реакторной установки 75%. Общая мощность теплоотведения теплообменников СПОТ составила более 100 МВт при температуре окружающего воздуха –13°C, время ее выхода на мощность не превысила 90 с, что соответствует проектным характеристикам системы [10].

### Литература

1. Отчет по обоснованию безопасности. Нововоронежская АЭС-2. Энергоблок № 1. Глава 12. Системы безопасности. – М.: АО «Атомэнергoproject», 2013. – 240 с.
2. Андрушечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
3. Афров А.М., Андрушечко С.А., Украинцев В.Ф. и др. ВВЭР-1000: Физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 488 с.
4. Оборудование системы пассивного отвода тепла. Пояснительная записка (392М.19 ПЗ). – Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС». 2008. – 33 с.
5. Оборудование системы пассивного отвода тепла. Технологический регламент эксплуатации (392М.19 Д4). – Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС». 2010. – 25 с.
6. Акт № 1009 о выявленном несоответствии. – Нововоронеж: Нововоронежская АЭС, 2015. – 2 с.
7. Акт № 61/2017-РЦ6/06-02 проверки работоспособности воздушных затворов СПОТ. – Нововоронеж: Нововоронежская АЭС. 2017. – 6 с.
8. Инструкция по эксплуатации системы пассивного отвода тепла 1 JNB50-80. – Нововоронеж: Нововоронежская АЭС, 2015. – 99 с.
9. Акт № 640/2016-РЦ6/06-02 проверки состояния регулирующих устройств СПОТ. – Нововоронеж: Нововоронежская АЭС, 2016. – 5 с.
10. Протокол пусконаладочных работ «Проверка эффективности работы СПОТ (комплексное опробование)». – Нововоронеж: «Нововоронежатомтехэнерго». 2017. – 7 с.

Поступила в редакцию 26.06.2017 г.

### Авторы

Галиев Камиль Фанисович, инженер по организации эксплуатации и ремонту РЦ № 6

E-mail: GalievKF@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Яуров Сергей Васильевич, инженер по организации эксплуатации и ремонту РЦ № 6

E-mail: YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Гончаров Евгений Владимирович, заместитель начальника РЦ № 6 по ремонту

E-mail: GoncharovEV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Вольнов Алексей Сергеевич, начальник РЦ № 6

E-mail: VolnovAS@nvnpp1.rosenergoatom.ru

UDC 621.039

## EXPERIENCE OF COMMISSIONING THE V-392M REACTOR PLANT PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM

Galiev K.F., Yaurov S.V., Goncharov Ye.V., Volnov A.S.

Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» «Novovoronezh Nuclear Power Plant»

1 Promyshlennaya zona Yuzhnaya, Novovoronezh, Voronezh reg.,  
396072 Russia

### ABSTRACT

Structural features of components in the passive heat removal system (PHRS), first used in Russia in the VVER-1200 reactor, are considered. Structural deficiencies



of the system's air valves and regulators, revealed in the process of pre-commissioning activities and hampering the performance by the system of its design functions, are described. The causes for the deficiencies are unpredictable effects of the fluid thermodynamic processes on moving components. The equipment deficiencies were eliminated through the installation of additional equipment retainer units responding to the system actuation, and by additional adjustment of components. The retainer design allows the air valves to stay fully opened and prevents them from closing uncontrollably under the action of a rapidly ascending hot air flow inside the PHRS shell.

During the commissioning stage of Novovoronezh NPP II's unit 1, following the equipment design update, the PHRS confirmed to be indispensable as the means of the reactor heat removal in conditions of an unexpected reactor scram, and proved to be efficient as part of an integrated PHRS test at the reactor plant power of 75%. The PHRS heat exchanger's total heat removal capacity was over 100 MW, with the ambient air temperature being  $-13^{\circ}\text{C}$ , and the time for the PHRS rise to power was not more than 90 seconds, which meets the system's design performance.

**Key words:** AES-2006 design, V-392M, VVER-1200, passive heat removal system, air valve, regulator, pre-commissioning.

#### REFERENCES

1. Safety assessment report. Novovoronezh NPP-2 Power unit No. 1. Chapter 12. Safety systems. Moscow. JSC Atomenergoproect Publ., 2013, 240 p. (in Russian).
2. Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasilyev B.Yu., Generalov V.N., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Ukraintsev V.F. NPP with VVER-1000 type reactor. From physical basics of exploitation to evolution design. Moscow. Logos Publ., 2010. 604 p. (in Russian).
3. Afrov A.M., Andrushechko S.A., Ukraintsev V.F., Vasilyev B.Yu., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Kokosadze E.L., Ivanov E.A. VVER-1000: physical basics of exploitation, nuclear fuel, safety. Moscow. University book, Logos Publ., 2006, 488 p. (in Russian).
4. Equipment of passive heat removal system. Explanatory note (392M.19 PZ). Podol'sk. OKB «GIDROPRESS» Publ., 2008, 33 p. (in Russian).
5. Equipment of passive heat removal system. Technological regulation of operation (392M.19 D4). Podol'sk. OKB «GIDROPRESS» Publ., 2010, 25 p. (in Russian).
6. Act No. 1009 on the identified non-compliance. Novovoronezh. Novovoronezh NPP Publ., 2015, 2 p. (in Russian).
7. Act No. 61/2017-ПЦ6/06-02 of checking operability of air shutters PHRS. Novovoronezh. Novovoronezh NPP Publ., 2017, 6 p. (in Russian).
8. Operating instruction of passive heat removal system 1 JNB50-80. Novovoronezh. Novovoronezh NPP Publ., 2015, 99 p. (in Russian).
9. Act No. 640/2016-ПЦ6/06-02 of checking condition of regulating devices PHRS. Novovoronezh. Novovoronezh NPP Publ., 2016, 5 p. (in Russian).
10. Commissioning protocol «Checking the effectiveness of PHRS (Complex testing)». Novovoronezh. Novovoronezh branch of «Atomtechenego» Co, 2017, 7 p. (in Russian).

#### Authors

Galiev Kamil Fanisovich, Engineer

E-mail: GalievKF@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Yaurov Sergey Vasilyevich, Engineer

E-mail: YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Goncharov Evgeniy Vladimirovich, Deputy Head of Department

E-mail: GoncharovEV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Volnov Aleksey Sergeevich, Head of Department

E-mail: VolnovAS@nvnpp1.rosenergoatom.ru