

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПУСКОНАЛАДОЧНЫХ РАБОТ ПО СИСТЕМЕ АВАРИЙНОГО И ПЛАНОВОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ БЛОКА АЭС-2006 С РУ В-392М

Д.Б. Стацура*, **А.С. Вольнов***, **В.Н. Шкаленков****, **К.В. Жирнов****, **Р.М. Топчиян****

* *Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» 396071, Воронежская обл. г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, 1*

** *АО «Атомэнергoproject»,*

107996, Московская обл., г. Москва, ул. Бакунинская, дом 7, строение 1



Приводится описание принятого в проекте АЭС-2006 совмещения функций безопасности и нормальной эксплуатации на примере двухканальной структуры активных систем безопасности с указанием главных инновационных решений и их отличий от предыдущих проектов, таких как

– применение в системе аварийного и планового расхолаживания первого контура и охлаждения бассейна выдержки агрегата «насос-эжектор»;

– система аварийного и планового расхолаживания и охлаждения бассейна выдержки спроектирована из двух полностью независимых каналов (канал системы состоит из двух ниток, каждая нитка канала имеет производительность 100%);

– кратность резервирования составляет $2 \times 200\%$.

Для проектов В-392М и В-320 рассматриваются различия систем аварийного и планового расхолаживания. Показано выполнение приемочных критериев по результатам испытаний, в том числе дополнительных, проведенных при вводе в эксплуатацию блока № 1 НВАЭС-2 с РУ В-392М, в различных режимах. Дается описание и приводится схема испытаний на полномасштабном стенде для обоснования ресурсных характеристик агрегата «насос-эжектор», которые планируется провести в 2017 г., включающих в себя проверку состояния внутренних поверхностей сопла водоструйного насоса, испытания водоструйного насоса на ресурс с последующей проверкой на отсутствие повреждений и видимых дефектов на поверхности сопла.

В результате введенных инноваций увеличена общая надежность систем безопасности. Успешное завершение ресурсных испытаний агрегата «насос-эжектор» системы аварийного и планового расхолаживания позволило подтвердить надежность и эффективность использованного впервые в системах безопасности АЭС водоструйного агрегата.

Ключевые слова: резервирование, совмещение функций, надежность, обоснование безопасности, испытания, эжектор, аварийное расхолаживание, охлаждение топлива.

ВВЕДЕНИЕ

27 февраля 2017 г. введен в промышленную эксплуатацию энергоблок № 1 НВАЭС-2 – головной блок проекта АЭС-2006 с РУ В-392М.

При проектировании систем, входящих в состав активной части систем безопаснос-

© **Д.Б. Стацура, А.С. Вольнов, В.Н. Шкаленков, К.В. Жирнов, Р.М. Топчиян, 2017**

ти, с целью повышения функциональной надежности принят принцип, заключающийся в совмещении функций безопасности и нормальной эксплуатации. В проекте приняты схемные решения, на основании которых возможен перевод работающих каналов в режим выполнения функций безопасности либо вообще без команд активизации и переключения механизмов, либо с минимальным количеством переключений только арматуры. Такой принцип позволяет значительно уменьшить необнаруженные отказы [1, 14 – 17].

Развитие принципа совмещения функций позволило принять простые технологические решения, обеспечивающие в процессе развития аварии выполнение ряда последовательных функций безопасности одним набором механизмов (например, подачу воды в активную зону при высоком и низком давлении), что исключает необходимость дополнительных переключений, являющихся источником отказов, допускает уменьшение количества единиц оборудования, трубопроводов, арматуры, блокировок и т.п.

Одним из отличий проекта АЭС-2006 с РУ В-392М от серийных АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и от проекта АЭС-92 является двухканальная структура активных систем безопасности. Это также является одним из основных отличий проекта НВАЭС-2 от проекта ЛАЭС-2.

Обоснование соблюдения принципа единичного отказа в проекте АЭС-2006 с РУ В-392М выполнено путем анализа надежности активных систем безопасности и анализа допустимой продолжительности вывода из работы каналов указанных систем. Возможность отказа от третьего канала систем безопасности обоснована наличием пассивных систем, дублирующих выполнение функций безопасности, связанных с отводом тепла от активной зоны реактора – гидроемкостей второй ступени (ГЕ-2) и системы пассивного отвода тепла от парогенераторов (СПОТ) [2, 5, 6].

Одним из главных инновационных решений является применение в проекте системы аварийного и планового расхолаживания первого контура и охлаждения бассейна выдержки (БВ) агрегата «насос-эжектор» (связка насоса высокого давления и водоструйного насоса), функциональные свойства которого эквивалентны совместному действию насосов высокого и низкого давления в других проектах АЭС [3, 6, 7].

Указанная схема выгодно отличается от известных решений, так как позволяет повысить общую надежность систем безопасности, снизив нагрузку на дизель-генератор аварийного энергоснабжения, уменьшить количество ступеней автоматического пуска дизель-генератора, снизить количество арматуры и блокировок.

СИСТЕМА АВАРИЙНОГО И ПЛАНОВОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ ПРОЕКТА АЭС-2006 С РУ В-392М В СРАВНЕНИИ С АНАЛОГИЧНОЙ СИСТЕМОЙ ПРОЕКТА В-320

Система аварийного и планового расхолаживания и охлаждения бассейна выдержки (JNA) состоит из двух полностью независимых каналов, идентичных по составу входящего в них оборудования.

В состав каждого канала входят

- теплообменник аварийного и планового расхолаживания 11(12)JNA10(20)AC001;
- центробежный насос низкого давления 11(12)JNA11(21)AP001;
- центробежный насос высокого давления 11(12)JNA12(22)AP001;
- водоструйный насос 11(12)JNA12(22)BN001;
- обратные и предохранительные клапаны, запорная и регулирующая арматура;
- трубопроводы.

Канал системы состоит из двух ниток, резервирующих друг друга (кроме функции аварийной подпитки первого контура в режиме «малых течей»). Каждая нитка канала имеет производительность 100%. Одна нитка канала присоединена между обратными клапанами сливной линии системы гидроемкостей первой ступени, подающими раствор борной кислоты в сборную и напорную камеры реактора; вторая нитка присоединена к горячей и холодной ниткам петли ГЦК. Любая нитка канала может работать по контуру

охлаждения БВ. Отбор теплоносителя первого контура для планового расхолаживания осуществляется из горячих ниток (два штуцера DN300 – на петлях № 2 и 4), а для ремонтного расхолаживания – из холодных ниток указанных петель ГЦК. Отборы выполнены из петель ГЦК, к которым не подсоединены напорные трубопроводы системы аварийного и планового расхолаживания и охлаждения БВ, что обеспечивает надежную циркуляцию охлаждаемого теплоносителя через активную зону реактора.

При аварийном расхолаживании с разуплотнением первого контура подача воды в реактор в начальный период осуществляется из БВ с дальнейшим переходом на работу из приямка герметичной оболочки.

Основным назначением нитки с насосом высокого давления и водоструйным насосом является подпитка реактора в режимах с малыми течами, когда давление в первом контуре ниже 8 МПа. В этом режиме водоструйный насос играет роль гидравлического сопротивления и обеспечивает функционирование насоса высокого давления в рабочей зоне расходно-напорной характеристики.

Дополнительным назначением этой нитки является резервирование нитки с насосом низкого давления (в случае его отказа) в режимах

- аварийной подпитки реактора при низком давлении;
- аварийного расхолаживания реакторной установки;
- планового расхолаживания реакторной установки;
- ремонтного расхолаживания реакторной установки.

Нитка с насосом высокого давления и водоструйным насосом резервирует систему охлаждения БВ.

В указанных режимах водоструйный насос работает по своему прямому назначению – увеличению расхода, подаваемого насосом высокого давления.

Режим охлаждения бассейна выдержки. Охлаждение топлива в БВ в режиме нормальной эксплуатации обеспечивается одним из каналов системы охлаждения БВ (FAK10-20). Система JNA является резервной и выполняет функцию охлаждения топлива в БВ при выводе в ремонт оборудования системы FAK10-20 (рис. 1). При полной выгрузке активной зоны в БВ поддержание требуемой температуры обеспечивается совместной работой одного канала системы FAK10-20 и одного канала системы JNA.

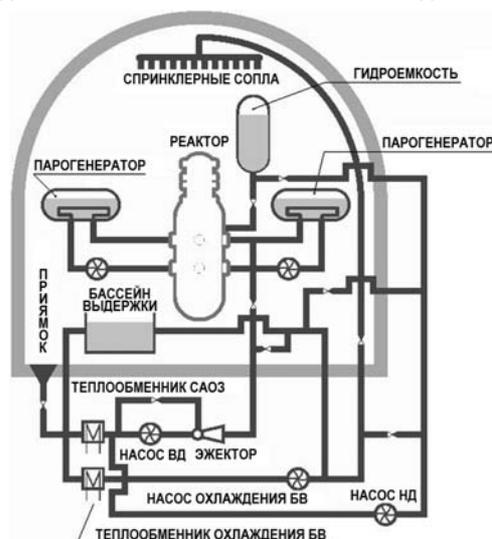


Рис. 1. Упрощенная схема канала системы JNA и системы FAK10-20

Режим поддержания запаса воды в реакторе и аварийное расхолаживание. При авариях с большой течью (разрыв трубопровода диаметром более 100 мм, включая раз-

рыв главного циркуляционного трубопровода диаметром 850 мм) отвод тепла от активной зоны и поддержание необходимого запаса теплоносителя в реакторе обеспечиваются за счет непрерывной циркуляции борного раствора с помощью системы аварийного и планового расхолаживания первого контура и охлаждения БВ.

В начальный момент аварии подача борного раствора в реактор осуществляется из БВ. Через некоторое время после начала аварии уровень воды в БВ снижается до такого минимального значения, при котором происходит переключение насосов на работу из приямка. К этому моменту в приямке за счет истечения из первого контура (включая запас воды гидроемкостей систем пассивного залива активной зоны) образуется достаточный запас борного раствора, необходимого для обеспечения бескавитационной работы насосов. После переключения с БВ на приямок система JNA обеспечивает непрерывный отвод остаточных тепловыделений по замкнутому контуру через теплообменник.

При авариях с течью теплоносителя первого контура подача воды в реактор при давлении в диапазоне от 7,9 до 2,5 МПа обеспечивается насосом высокого давления (предвключенным насосом для водоструйного насоса). При снижении давления ниже 2,5 МПа подключается насос низкого давления. Подключение водоструйного насоса происходит за счет открытия обратного клапана при давлении в первом контуре менее 1,5 МПа из бассейна выдержки и давлении менее 1,35 МПа из приямка.

Режим планового расхолаживания. В этом режиме при температуре в первом контуре не более 150°C и давлении ниже 1,96 МПа расхолаживание первого контура осуществляется с помощью системы JNA. Теплоноситель первого контура забирается из горячей части петель № 2 и 4 главного циркуляционного контура и по трубопроводу DN300 и через теплообменник поступает на всас насосов, обеспечивающих циркуляцию теплоносителя. При работе насосов высокого давления совместно с водоструйными насосами (рис. 2) охлажденный теплоноситель возвращается в холодные части петель № 1 и 3, при работе насосов низкого давления охлажденный теплоноситель возвращается через трубопроводы, соединяющие емкости CA03 с нижней камерой реактора.

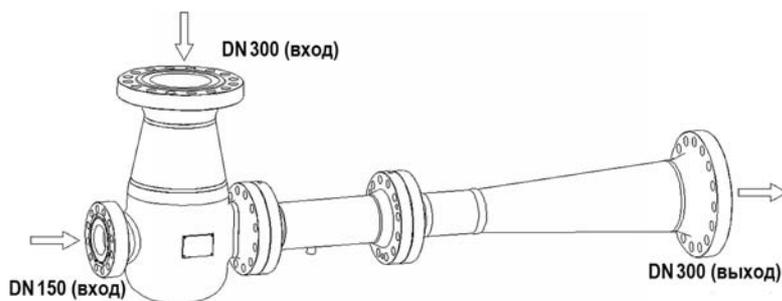


Рис. 2. Базовая схема водоструйного насоса

Режим ремонтного расхолаживания. Здесь отвод тепла от активной зоны осуществляется при снятой крышке реактора при температуре теплоносителя первого контура не выше 70°C. Забор теплоносителя осуществляется из холодной части петель № 2 и 4 ГЦК. С помощью каналов системы теплоноситель охлаждается и возвращается в горячие нитки петель № 1 и 3 или в трубопроводы, соединяющие емкости CA03 с верхней камерой реактора.

Режим подачи воды на спринклерные форсунки. Для снижения параметров (давления и температуры) внутри защитной оболочки при отказе системы охлаждения БВ на подачу раствора борной кислоты на спринклерные форсунки могут быть использованы насосы низкого давления системы JNA.

Можно отметить пять основных различий систем аварийного и планового расхолаживания для проектов В-392М и В-320 (табл. 1):

Таблица 1

Сравнение требований к внешним системам В-320 и В-392М

В-320		В-392М	
Подача РБК насосами высокого давления при аварийном расхолаживании			
Давление, МПа	Расход, м ³ /ч	Давление, МПа	Расход, м ³ /ч
9 со снижением до 1,5	130	6,8 со снижением до нуля	От 0 до 636,5
При разрыве трубопроводов ПГ подача раствора борной кислоты (РБК) в реактор производится с расходом не менее 250 м ³ /ч (обеспечивается двумя каналами безопасности). Подача (РБК) в начальный момент времени осуществляется с концентрацией 40 г/дм ³ с дальнейшим переходом на подачу РБК с концентрацией 16 г/дм ³ из бака-приямка		Подача РБК в первый контур из БВ (аварийный запас для работы активной части САОЗ объемом 750 м ³) осуществляется с концентрацией 16 г/дм ³ . Применение агрегата «насос-эжектор» (связка насоса высокого давления и водоструйного насоса), резервирующего насоса низкого давления по функции подачи РБК в первый контур при низких давлениях в первом контуре.	
Подача РБК насосами низкого давления при аварийном расхолаживании			
Давление, МПа	Расход, м ³ /ч	Давление, МПа	Расход, м ³ /ч
2,1 со снижением до 0,098	230 с увеличением до 750	2,5 со снижением до нуля	0 с увеличением до 900 (из БВ) или до 874 (из приямка)
Подача раствора борной кислоты осуществляется из аварийного бака-приямка		Подача раствора борной кислоты осуществляется из БВ (аварийный запас для работы активной части САОЗ объемом 750 м ³), затем переход на работу из приямка	
Плановое расхолаживание			
Давление, МПа	Расход, м ³ /ч	Давление, МПа	Расход, м ³ /ч
2,1 со снижением до 0,098	230 – 750	2,1 со снижением до 0,098	800
Достаточна работа одного канала. Разность температур теплоносителя и воды, подаваемой в первый контур, не более 30°C		В работе одного канала два насоса. Разность температур теплоносителя и воды, подаваемой в первый контур, не более 45°C.	

– для аварийных режимов работы проекта В-392М требования по подаче воды являются более жесткими, поскольку вместо диапазона расхода указаны конкретные значения, отклонение от которых не должно превышать 10% (превышение указанной в таблице величины является недопустимым, так как требует проведения дополнительных обоснований по критерию хрупкой прочности оборудования РУ);

– аварийный запас раствора борной кислоты для проекта В-392М хранится в БВ (при этом используется объем БВ выше уровня, необходимого для безопасного хранения ТВС);

– кратность резервирования $3 \times 100\%$ для проекта В-320, $2 \times 200\%$ для проекта В-392М (кроме функции аварийной подпитки первого контура в режиме «малых течей» – в диапазоне давлений от 8 до 2,5 МПа).

– в проекте В-392М, по сравнению с проектом В-320, система выполняет функцию охлаждения БВ при полной выгрузке активной зоны в БВ совместно с его системой охлаждения, а также резервирует систему охлаждения БВ при ее отказе;

– в проекте В-392М система резервирует спринклерную систему при ее отказе по функции снижения параметров под оболочкой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

При вводе в эксплуатацию блока АЭС-2006 с РУ В-392М были проверены различные режимы:

- подключение системы к реактору, в том числе при разуплотненном состоянии реактора, для планового или ремонтного расхолаживания;
- отвод остаточных тепловыделений от активной зоны к конечному поглотителю и расхолаживание первого контура со скоростью до 30°C/ч до температуры от 60 до 70°C;
- поддержание температуры в реакторе не выше 70°C в период ППР и перегрузки топлива, в том числе при плановосниженном уровне воды в реакторе;
- поддержание температуры в реакторе не выше 100°C через 24 часа после остановки реактора по сигналу «течь первого контура» и стабилизации его состояния (режим рециркуляции) с учетом проектного срабатывания СА03 и систем аварийного отвода тепла через второй контур;
- поддержание температуры в БВ топлива не выше 45°C и не выше 60°C при полной выгрузке активной зоны.

По результатам испытаний приемочные критерии достигнуты.

В одном из режимов (режим подачи воды на уплотненный первый контур от агрегата «насос-эжектор» из БВ) было выявлено, что подача воды при противодействии в первом контуре более 7,4 МПа (табл. 2) от агрегата «насос-эжектор» отсутствует, и приемочные критерии не соблюдаются. В связи с этим ОКБ «Гидропресс» были проведены дополнительные расчетные обоснования и уточнены требования по зависимости расхода раствора борной кислоты, подаваемого в первый контур агрегатом «насос-эжектор» от противодействия.

Таблица 2

Испытание агрегата «насос-эжектор» канала 11JNA12 в режиме подачи воды из БВ на уплотненный первый контур

Приемочные критерии		Результаты испытания	
Противодавление в первом контуре, МПа	Расход от агрегата «насос-эжектор», м ³ /ч	Расход от агрегата «насос-эжектор», м ³ /ч	Отклонение, %
1,12	582,0	570	- 2,1
1,13	573,9	558,6	- 2,6
1,15	557,8	531,5	- 4,7
1,20	517,0	48,1	- 6,9
1,3	431,8	386	- 10,6
1,33	404,6	347	- 14,2
1,35	386,5	322	- 16,7
1,40	341,3	313	- 8,3
1,46	288,8	311	7,7
1,5	280,6	277,9	- 0,96
1,8	252,8	271,693	7,47
2,8	230,8	250,246	8,43
3,8	206,5	227,77	10,3
4,8	180,1	200,54	11,35
5,8	150,4	167,37	11,28
6,8	114,8	113,553	- 1,09
7,8	56,6	-	-
7,86	39,6	-	-

Примечание. Значения объемного расхода теплоносителя, подаваемого в первый контур, могут отличаться по абсолютной величине от приведенных в таблице не более чем на 10%

Для обоснования ресурса агрегата «насос-эжектор» по требованию «Ростехнадзора» были проведены дополнительные испытания на предмет отсутствия влияния кавитационной эрозии на проточную часть водоструйного насоса. Испытания уменьшенной модели насоса (1:2,25) в течение 30-ти суток, проведенные изготовителем водоструйного насоса Turboinstitut для обнаружения износа материалов проточной части насоса

вследствие кавитационной эрозии, при выполнении экспертизы были признаны недостаточными [4, 11, 12].

Испытания водоструйного насоса проводились по контуру охлаждения БВ в течение 72 ч в соответствии со схемой, показанной на рис. 3 [5, 6].

Критериями успешности испытания [9, 10, 13] были определены

- отсутствие видимых следов кавитационной эрозии на поверхностях проточной части водоструйного насоса;
- неизменность расходно-напорной характеристики (критерий неизменности – значения расхода, определяемые по расходомеру, установленному на выходе из водоструйного насоса, в пределах погрешности измерения).

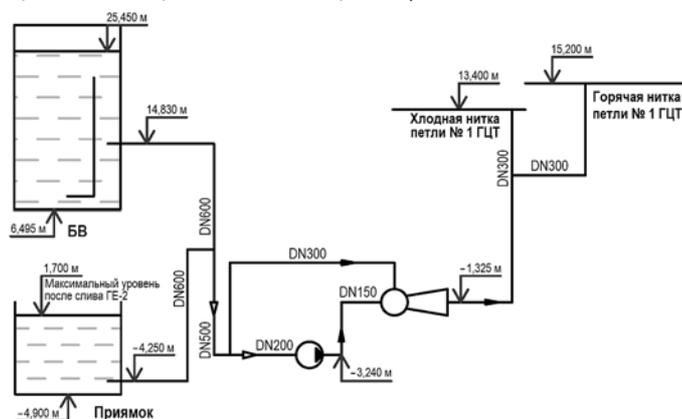


Рис. 3. Схема циркуляции при работе в аварийных режимах (на примере первого канала)

При проведении испытаний контролировались

- температура воды в БВ;
- уровень воды в БВ;
- расход водоструйного насоса;
- расход предвключенного насоса;
- давление на напоре и всасе предвключенного насоса.

Испытания были выполнены на этапе холодной обкатки в ноябре 2015 г.

Осмотр внутренних поверхностей водоструйного насоса осуществлялся с помощью видеоэндоскопа, проводился также радиографический и ультразвуковой контроль.

По результатам испытаний не обнаружено следов эрозии проточной части, расход водоструйного насоса оставался неизменным в течение испытаний.

С учетом дополнительных испытаний были сняты основные замечания экспертизы по системе JNA и получена лицензия на эксплуатацию блока № 1. Однако в условиях действия лицензии на эксплуатацию было указано специальное требование по подтверждению работоспособности водоструйного насоса при противодавлении 1,0 – 1,4 МПа. Работа насоса в данной области противодавлений возможна лишь в случае, когда расход насоса равен расходу через течь (режим с «зависанием» давления). По мнению экспертов, данный диапазон противодавления соответствует режиму «скрытой» кавитации, а расходно-напорная характеристика водоструйного насоса в этом режиме является неустойчивой [5 – 8].

Продолжительность такого режима оценивается как кратковременная (не более часа), поскольку оператор, в соответствии с указаниями инструкции по ликвидации аварий, при возникновении такой ситуации должен снизить давление в первом контуре ниже 1,0 МПа и перевести водоструйный насос в область устойчивой работы.

Для снятия замечаний экспертизы и выполнения соответствующего требования УДЛ была подготовлена дополнительная программа испытаний по контуру, моделирующему

работу водоструйного насоса при противодавлении 1,0 – 1,4 МПа. Испытания проводились в марте 2016 г. на этапе «физический пуск» до начала разогрева первого контура перед выходом на МКУ. Забор теплоносителя осуществлялся из горячих ниток петель № 2 и 4 при атмосферном давлении в первом контуре. Противодействие моделировалось подачей теплоносителя в первый контур через байпасные линии с дроссельными шайбами.

При испытаниях водоструйного насоса была выявлена повышенная вибрация трубопроводов. Однако работоспособность водоструйного насоса при противодавлении в течение 16-ти часов подтверждена, по результатам осмотра не обнаружено следов эрозии проточной части.

Таким образом, испытания подтвердили отсутствие влияния кавитационной эрозии на проточную часть водоструйного насоса, критерии успешности испытания были достигнуты.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В ноябре 2016 г. в условиях действия лицензии на эксплуатацию внесено требование: «Предприятию необходимо обосновать ресурсные характеристики агрегата «насос-эжектор» на стенде». Для выполнения данного требования подготовлено и согласовано с АО «Атомэнергопроект» техническое задание «Проведение ресурсных испытаний водоструйного насоса».

В объем ресурсных испытаний водоструйного насоса входят

- предварительная проверка состояния внутренних поверхностей сопла водоструйного насоса на отсутствие повреждений и видимых дефектов на поверхности сопла (визуальный контроль с использованием фото- и видеосъемки без разборки насоса);
- наработка ресурса в объеме 30-ти суток на рабочих параметрах (табл. 3), соответствующих режиму работы водоструйного насоса с подачей воды в первый контур из приемка (испытания на ресурс) на стенде (рис. 4);
- проверка состояния внутренних поверхностей сопла водоструйного насоса на отсутствие повреждений и видимых дефектов на поверхности сопла (визуальный контроль путем фото- и видеосъемки без разборки насоса).

Таблица 3

Параметры сред при проведении ресурсных испытаний водоструйного насоса

Наименование параметра	Значение
Рабочая среда	Борированная вода
рН	От 4,2
Рабочая температура, °С	70
Рабочее давление на входе в водоструйный насос (абс.), МПа	До 6,81
Давление перекачиваемой (пассивной) рабочей среды на входе в водоструйный насос (абс.), МПа	До 0,136
Давление на выходе из водоструйного насоса (абс.), МПа	До 1,49
Расход на выходе из водоструйного насоса, м ³ /ч	До 470
Расход перекачиваемой среды на входе в камеру смешения водоструйного насоса, м ³ /ч	До 260

Для проведения испытаний планируется использовать центробежный и водоструйный насосы, изготовленные для блока № 2 НВАЭС-2.

Результатом работы должно быть экспериментальное подтверждение работоспособности водоструйного насоса в течение 30 сут при условиях его работы, полностью соответствующих условиям работы блока АЭС-2006 с РУ В-392М в аварийном режиме с подачей воды в первый контур из приемка.

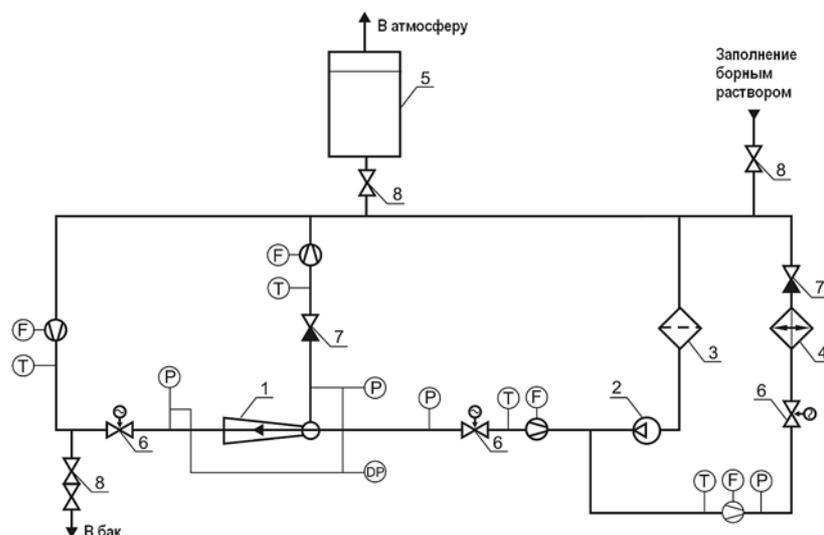


Рис. 4. Принципиальная схема испытательного стенда: 1 – водоструйный насос; 2 – циркуляционный насос; 3 – механический фильтр; 4 – теплообменник; 5 – компенсатор объема; 6 – регулирующая арматура; 7 – обратные клапаны; 8 – запорная арматура; P – измерение давления; T – измерение температуры; F – измерение давления

ВЫВОДЫ

Успешное завершение ресурсных испытаний агрегата «насос-эжектор» системы аварийного и планового расхолаживания позволяет подтвердить надежность и эффективность использованного впервые в системах безопасности АЭС водоструйного агрегата.

Внедрение апробированного агрегата при проектировании новых АЭС позволит сократить как затраты на оборудование, так и время на проектирование и обоснование.

Литература

1. НП-001-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций». – М.: ФБУ НТЦ ЯРБ, 2016. – 56 с.
2. Андрущечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
3. Афров А.М., Андрущечко С.А., В. Ф. Украинцев, Б. Ю. Васильев, К. Б. Косоуров, Ю. М. Семченков, Э. Л. Кокосадзе, Е. А. Иванов. ВВЭР-1000: Физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность – М.: Логос, 2006. – 487 с.
4. НП-010-16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций». Москва, 2016. Электронный ресурс http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_196163/ (дата доступа 20.06.2017 г.)
5. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
6. Нововоронежская АЭС. Проект АЭС-2006. Электронный ресурс <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/f01/f01b5ca309dbda1917c112d6897c0959.pdf> (дата доступа 20.06.2017 г.)
7. Морозов В.Б., Любарский А.В., Минибаев Р.Ф. Оценка допустимого времени нахождения блока на мощности для различных конфигураций систем безопасности / Сб. трудов X Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2017.
8. Перник А.Д. Проблемы кавитации. – Л.: Судостроение, 1966. – 435 с.
9. Трубкин Е.П., Карасев Э.К., Вазингер В.В., Ларионов Н.П., Алаев Н.И., Никонов С.М. Результаты исследования эрозионной стойкости материалов в высокоскоростных потоках воды и двухфазной смеси проточной части инжекторов. // Теплоэнергетика. – 2007. – №2. – С. 9-12.
10. Лямов Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки. – Л.: Машиностроение, 1998. – 256 с.

11. Pearsall I. Cavitation. – Mills and Boon Limited, London, 1972. – 93 p.
12. Knapp R.T. Daily J.W., Hammit F.G. Cavitation. – McGraw-Hill, New York, 1970.
13. Герлига В.А., Скалозубов В.И. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
14. Скоморохов А.О., Слепов М.Т. Контроль достоверности информации в системе вибродиагностики Нововоронежской АЭС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1999. – №1. – С. 56-65.
15. Аминов Р.З., Хрусталева В.А., Духовенский А.С., Осадчий А.И. АЭС с ВВЭР: Режимы, характеристики, эффективность. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 264 с.
16. Горшков А.М. Насосы. – М.: Госэнергоиздат, 1947. – 188 с.
17. Яременко О.В. Испытания насосов. Справочное пособие – М. Машиностроение, 1976. – 114 с.

Поступила в редакцию 26.06.2017 г.

Авторы

Стацура Дмитрий Борисович, начальник управления

E-mail: StatsuraDB@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Вольнов Алексей Сергеевич, начальник реакторного цеха

E-mail: VolnovAS@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Шкаленков Виктор Николаевич, директор по проектированию АЭС «Руппур»

E-mail: Shkalenkov_VN@aep.ru

Жирнов Кирилл Владимирович, зам. начальника отдела

E-mail: Zhirnov_KV@aep.ru

Топчиан Рубен Мигружанович, зам. генерального директора, директор по проектированию

E-mail: Topchian_RM@aep.ru

UDC 621.039.4

KEY RESULTS OF PRE-COMMISSIONING ACTIVITIES FOR THE EMERGENCY AND SCHEDULED COOLDOWN SYSTEM OF THE AES-2006 UNIT WITH THE V-392M REACTOR PLANT

Statsura D.B.*, Volnov A.S.*, Shkalenkov V.N.**, Zhirnov K.V.**, Topchiyan R.M.**

* Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» «Novovoronezh Nuclear Power Plant»
1 Promyshlennaya zona Yuzhnaya, Novovoronezh, Voronezh Region,
396072, Russia

** JSC «Atomenergoproekt». 7 Bakuninskaya st., bldg. 7, Moscow, 107996 Russia

ABSTRACT

The paper describes the combination of safety and normal operation functions adopted in the AES-2006 design, as illustrated by a two-channel structure of active safety systems, showing the major innovative solutions and their differences from earlier designs, such as

- use of a pump-ejector assembly in the primary circuit emergency and scheduled cooldown and spent fuel pool cooling system;
- the emergency and scheduled cooldown and spent fuel pool cooling system has been designed as two fully independent channels (each of the system's channels consists of two legs, each channel leg having a capacity of 100%);
- the redundancy rate is $2 \times 200\%$.

Differences in the emergency and scheduled cooldown systems are considered for the V-392M и V-320 designs. The fulfillment of the acceptance criteria has been shown based on test results, including additional tests performed in different modes during the commissioning of Novovoronezh NPP II's unit 1 with the V-392M reactor plant. A description and a pattern are provided for the full-scale simulator tests to justify the long-term performance of the pump-ejector assembly scheduled for 2017, including the inspection of the water jet pump nozzle inner surface condition and the water jet pump durability tests

followed by examination for the absence of damage and visible defects to the nozzle surface.

The overall reliability of safety systems has been improved as the result of the innovations. The successful durability tests of the emergency and scheduled cooldown system pump-ejector assembly have proved the reliability and efficiency of the water jet unit used for the first time in the NPP safety systems.

Key words: redundancy, combination of functions, reliability, safety case, tests, ejector, emergency cooldown, fuel cooling.

REFERENCES

1. NP 001-15. Federal rules and regulations in the field of nuclear energy use «General Safety Assurance Provisions for Nuclear Power Plants». Moscow. FBU NTC YaRB Publ., 2016, 56 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 a reactor of the VVER-1000 type. From the physical foundations of exploitation to the evolution of the project. 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 basis of operation, nuclear fuel, security. Moscow. Logos Publ. 2006. 487 p. (in Russian).
4. NP-010-1. Federal rules and regulations in the field of nuclear energy use «Rules for Design and Operation of Localizing Safety Systems of NPPs». Moscow. 2016. Available at http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_196163/ (accessed 20.06.2017) (in Russian).
5. Sokolov E.Y., Singer N.M. *Jet Machines*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989. 352 p. (in Russian).
6. Novovoronezh NPP. Project NPP-2006. Available at <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/f01/f01b5ca309dbda1917c112d6897c0959.pdf> (accessed 20.06.2017) (in Russian).
7. Morozov V.B., Lyubarsky A.V., Minibaev R.F. Estimating the permissible time of the block's operation on the power for various configurations of security systems. Proc. of the Xth International Scientific and Technical Conference «Ensuring the Safety of NPPs with VVER». Podolsk. OKB «Gidropress» Publ., 2017 (in Russian).
8. Pernik A.D. *Problems of Cavitation*. Leningrad. Sudostroenie Publ., 1966. 435 p. (in Russian).
9. Trubkin E.P., Karasev E.K., Vazinger V.V., Larionov N.P., Alayev N.I., Nikonov S.M. The results of the study of the erosion resistance of materials in high-speed water flows and a two-phase mixture of the flow-through part of the injectors. *Teploenergetika*. 2007, no. 2, pp. 9-12 (in Russian).
10. Lyamov B.F. Hydrojet Pumps and Installations. Leningrad. Mashinostroenie Publ. 1998. 256 p. (in Russian).
11. Pearsall I. *Cavitation*. Mills and Boon Limited. London, 1972. 93 p.
12. Knapp R.T., Daily J.W., Hammit F.G. *Cavitation*. McGraw-Hill. New York, 1970.
13. Gurliga V.A., Skalozubov V.I. *Bubble Boiling Streams in Power Equipment of NPPs*. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1992. 432 p. (in Russian).
14. Skomorokhov A.O., Slepov M.T. Control of the reliability of information in the vibrodiagnostic system of the Novovoronezh NPP. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 1999, no. 1, pp. 56-65 (in Russian).
15. Aminov R.Z., Khrustalev V.A., Dukhovensky A.S., Osadchy A.I. *NPP with VVER: Regimes, Characteristics, Efficiency*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1990, 264 p. (in Russian).
16. Gorshkov A.M. *Pumps*. Moscow. Gosenergoizdat Publ. 1947. 188 p. (in Russian).
17. Yaremenko O.V. Testing of Pumps. Reference Manual. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1976. 114 p. (in Russian).

Authors

Statsura Dmitry Borisovich, Head of Department

E-mail: StatsuraDB@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Volnov Aleksey Sergeevich, Head of Reactor Department

E-mail: VolnovAS@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Shkalenkov Viktor Nikolayevich, Director for the Design of Ruppur NPP

E-mail: Shkalenkov_VN@aep.ru

Zhirnov Kirill Vladimirovich, Deputy Head of Department

E-mail: Zhirnov_KV@aep.ru

Topchiyan Ruben Migruzhanovich, Deputy Director General – Design Director

E-mail: Topchian_RM@aep.ru