

**Модернизация ИПУ КД энергоблоков №5-6 Запорожской АЭС.
Перечень аварийных и эксплуатационных режимов. Выбор применимых
режимов и предварительных технических требований к ИПУ КД**

А.В.Жаврид, В.С.Бойчук

Отдел лицензирования ядерных установок ЗАЭС, г.Энергодар

Данный доклад освещает работу, проводимую на ЗАЭС по замене импульсных контрольно-предохранительных клапанов компенсатора давления (ИПУ КД) на блоках № 5-6. Работа проводится в рамках проекта U2.03/96 “Замена импульсных контрольно-предохранительных клапанов КД на блоках 5 и 6 ЗАЭС”.

Цель проекта - выполнение проектного и системного анализа относительно ЗАЭС, нацеленного на разработку технических требований к ИПУ КД.

Участники проекта:

- Подрядчик по проекту и руководитель общими работами АЭС Библис (Германия)
- Бенефициарий НАЭК «Энергоатом»
- Конечный пользователь ОП «Запорожская АЭС»
- Субподрядчик ЗАО «ЭИС»

Со стороны ОП ЗАЭС работа заключалась:

- в предоставлении Субподрядчику необходимых исходных данных;
- в предоставлении Субподрядчику предварительных технических требований.

Необходимость выполнения данной работы вызвана дополнительными требованиями по обеспечению безопасной эксплуатации РУ, предъявляемыми к системе защиты первого контура от превышения давления в связи:

- с выходом новых нормативных документов (НД) по безопасности АС;
- с опытом эксплуатации АЭС и рекомендациями МАГАТЭ.

На 5 и 6 блоках ЗАЭС установлены ИПУ КД типа УФ 50024-100, разработанные Киевским конструкторским бюро «КЦКБА» и изготовленные в России.

Планируемая модернизация ИПУ КД нацелена на устранение следующих недостатков и несоответствий:

1. ИПУ КД не аттестовано на работу в режиме сброса пароводяной смеси и воды. Кроме того, при эксплуатации ИПУ КД отмечалось, что попадание воды в ИК может приводить к нестабильному режиму работы импульсного клапана (постоянные циклы «открытие-закрытие»);
2. главный клапан не имеет указателя положения затвора;
3. электромагнитные привода импульсных клапанов и отключающих клапанов, как показал опыт эксплуатации, имеют низкую надежность. Конструктивно, электромагниты отключающих клапанов выполнены так, что их замена требует снижения параметров первого контура (расхолаживание и дренирование);
4. отсутствуют средства контроля протечек через клапана ИПУ КД;
5. низкая надежность указателей положения импульсного клапана;
6. узел регулировки давления посадки импульсного клапана требует при настройке снижение параметров 1 контура. При этом не обеспечивается точность настройки;
7. большое количество фланцевых разъемных соединений и низкая их надежность.

Данные недостатки в конструкции ИПУ КД в первую очередь обусловлены тем, что ИПУ КД были разработаны согласно требованиям НД, действующих на момент их проектирования.

Одним из недостатков настоящей конструкции ИПУ КД является ненадежная работа ИПУ КД на пароводяной смеси и воде. В переходных режимах работы реакторной установки с изменением давления при срабатывании ИПУ КД существует риск отказа клапанов на закрытие при работе на пароводяной смеси, что может привести к аварии с потерей теплоносителя. Кроме того, в случае аварии с потерей теплоотвода от первого контура, из-за неаттестации ИПУ КД для работы на пароводяной смеси и воде, становится невозможной процедура «сброса-подпитки», которая заключается в организации аварийной подпитки 1-го контура и сброса среды из компенсатора давления через ИПУ КД. Данная процедура могла бы стать альтернативным способом расхолаживания РУ через первый контур и снизить риск повреждения активной зоны в случае невозможности расхолаживания через 2-й контур.

Перечень аварийных и эксплуатационных режимов для разработки технических требований к ИПУ КД

Достаточность режимов для разработки технических требований к модернизируемому оборудованию определялась исходя из следующих условий:

- подтверждение проектных функций модернизируемого оборудования;
- подтверждение дополнительных, к существующим на настоящий момент, возможностей модернизируемого оборудования;
- анализ влияния наиболее опасного отказа модернизируемого оборудования на параметры РУ.

Проектные требования к ИПУ КД

Проектное требование к ИПУ КД - обеспечение непревышения давления в 1 контуре свыше 198 кгс/см^2 . Рост давления в 1 контуре возможен по следующим причинам:

- ухудшение теплоотвода со стороны 2 контура;
- нарушения в работе ТЭН КД;
- отключение ГЦН;
- непреднамеренная подача раствора борной кислоты от САОЗ ВД и/или системы подпитки 1 контура (создание жесткого контура).

Согласно [1] и эксплуатационным данным, наиболее быстрый рост давления, по причине ухудшения теплоотвода со стороны 2 контура, происходит в случае мгновенного сброса нагрузки до уровня собственных нужд. Необходимо рассмотреть способность клапана отвести энергию 1 контура, с соблюдением проектного требования к ИПУ КД.

При нарушении в работе ТЭН КД наиболее быстрый рост давления возможен при включении всех групп ТЭН. Необходимо рассмотреть способность клапана отводить энергию из КД, с соблюдением проектного требования к ИПУ.

Отключение ГЦН приводит к ухудшению циркуляции теплоносителя 1 контура и, соответственно, к ухудшению теплоотвода от активной зоны и росту давления в 1 контуре. Тем не менее, согласно [1] и опыта эксплуатации даже при отключении 4 ГЦН, благодаря аварийной защите и наличию теплоотвода со стороны 2 контура, давление 1 контура не превышает уставки срабатывания ИПУ КД. Следовательно, нет необходимости рассматривать данный режим.

При непреднамеренной подаче раствора борной кислоты от САОЗ ВД и/или системы подпитки 1 контура теплоноситель начинает заполнять КД. С момента

достижения отметки впрыска 1 контур станет «жестким», что приведет к росту давления и открытию ИПУ КД. В дальнейшем через клапан будет выбрасываться жидкая фаза теплоносителя. Необходимо рассмотреть способность клапана обеспечить непревышение давления в 1 контуре свыше 198 кгс/см².

Таким образом, для подтверждения проектных требований к ИПУ КД необходимо выполнение расчетного анализа для следующих ИС:

- *Мгновенный сброс нагрузки до уровня собственных нужд.*
- *Непреднамеренная подача раствора борной кислоты от насосов САОЗ ВД и/или системы продувки-подпитки 1 контура.*
- *Нарушение в работе ТЭН КД.*

Дополнительные возможности ИПУ КД

Для повышения уровня безопасности энергоблока необходимо предусмотреть возможность использования ИПУ КД:

- для защиты корпуса реактора от переопрессовки в «холодном» состоянии;
- для реализации процедуры «сброс-подпитка» в случае полной потери питательной воды ПГ.

Рост давления в 1 контуре, в «холодном» состоянии, возможен по следующим причинам:

- нарушение в работе ТЭН КД;
- непреднамеренная подача раствора борной кислоты от САОЗ ВД и/или системы подпитки 1 контура (создание «жесткого» контура);
- непреднамеренная подача раствора борной кислоты от ГЕ САОЗ;
- непреднамеренная подача азота в КД.

Для данных ИС защита корпуса реактора от переопрессовки возможна, если управление клапаном доступно в диапазоне давлений, не приводящих к переопрессовке.

Полная потеря подачи питательной воды в ПГ приводит к ухудшению теплоотвода со стороны 2 контура и, соответственно, к росту давления в 1 контуре. В результате работы ИПУ КД происходит выброс теплоносителя 1 контура. Восстановление запаса теплоносителя 1 контура и отвод тепла от активной зоны для этого ИС реализуется процедурой «сброс-подпитка». Использование ИПУ КД в процедуре «сброс-подпитка», совместно с насосами САОЗ ВД или НД, возможно, если управление клапаном доступно в диапазоне давлений напорных характеристик этих насосов.

Таким образом, для подтверждения данных возможностей ИПУ КД, необходимо выполнить расчетный анализ для следующих ИС:

- *Непреднамеренная подача раствора борной кислоты от насосов САОЗ ВД и/или системы продувки-подпитки 1 контура.*
- *Непреднамеренное подключение ГЕ САОЗ.*
- *Непреднамеренная подача азота в КД.*
- *Нарушение в работе ТЭН КД.*
- *«Сброс-подпитка» с САОЗ ВД*
- *«Сброс-подпитка» с САОЗ НД*

Отказ ИПУ КД

Согласно [1] «непосадка» рабочего органа ПК является наиболее опасным отказом для РУ. От поддержания запаса теплоносителя в 1 контуре (количества работающих насосов САОЗ) зависит как уровень в активной зоне, так и температура корпуса

реактора. Для исследования параметров РУ в ходе этого переходного процесса необходимо выполнить расчетный анализ для ИС:

- *Открытие и незакрытие ИПУ КД*

Выбор применимых режимов и предварительных технических требований к ИПУ КД

Основными критериями выбора оптимальной конструкции ИПУ КД являются:

- отсутствие недостатков, имеющих у ИПУ КД, на настоящее время;
- соответствие Правилам и Нормам по безопасности в атомной энергетике, действующих в Украине;
- повышение степени безопасности эксплуатации энергоблоков ЗАЭС.

В качестве режимов для разработки технических требований к ИПУ КД приняты режимы, цель которых, рассмотреть следующие желаемые возможности клапана:

1. Обеспечение непревышения давления в 1-м контуре более 198 кгс/см² (раздел 1);
2. Предотвращение состояния хладноломкости РУ (раздел 2);
3. Реализация процедуры «сброс-подпитка» (раздел 3).

«Непосадка» рабочего органа ПК является наиболее опасным отказом для РУ [1]. Анализ данного режима также необходимо провести для исследования состояния РУ в ходе переходного процесса (раздел 4).

Раздел 1 Защита I контура от превышения давления

- Мгновенный сброс нагрузки до уровня собственных нужд
- Непреднамеренная подача раствора борной кислоты от насосов САОЗ ВД и/или системы подпитки-продувки и борного регулирования I контура
- Нарушение в работе ТЭН КД

Раздел 2 Защита I контура от превышения давления в «холодном» состоянии

- Непреднамеренная подача раствора борной кислоты от насосов САОЗ ВД и/или системы подпитки-продувки и борного регулирования I контура
- Непреднамеренное подключение ГЕ САОЗ
- Непреднамеренная подача азота в КД
- Нарушение в работе ТЭН КД

Раздел 3 Анализ процедуры «сброс-подпитка» для режима «Полная потеря питательной воды»

- «Сброс-подпитка» с САОЗ ВД
- «Сброс-подпитка» с САОЗ НД

Раздел 4 Открытие и незакрытие ИПУ КД

Технические требования

Проектные требования

Общие проектные данные для ИПУ КД и характеристики рабочей среды представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Общие проектные данные для ИПУ

№ п/п	Наименование параметра	Единица физической величины	Значение
1.	Рабочее давление	кгс/см ² (МПа)	180(17,65)
2.	Рабочая температура	°С	355
3.	Производительность по пару (при рабочих параметрах)	т/ч (кг/с)	180,0(50)
4.	Давление полного открытия от пружины: - контрольного клапана; - рабочего клапана.	кгс/см ² (МПа)	192(18,8) 196(19,2)
5.	Давление начала открытия от пружины: - контрольного клапана; - рабочего клапана.	кгс/см ² (МПа)	185(18,1) 190(18,6)
6.	Давление обратной посадки от пружины: - контрольного клапана; - рабочего клапана.	кгс/см ² (МПа)	170(16,7) 174(17,1)
7.	Давление включения электромагнитов импульсных клапанов: - контрольного клапана; - рабочего клапана.	кгс/см ² (МПа)	180(17,7) 182(17,9)
8.	Давление отключения электромагнитов импульсных клапанов: - контрольного клапана; - рабочего клапана.	кгс/см ² (МПа)	190(18,7) 194(19,0)
9.	Герметичность в затворе	Торр*дм ³ /с	1*10 ⁻³
10.	Диаметр присоединяемых трубопроводов: - основной клапан: односторонний подвод: - входной - выходной; импульсный клапан: - входной - выходной.	мм мм мм мм	133x14 219x20 38x3,5 57x5,5
11.	Материал присоединяемого трубопровода		08X18Н10Т
12.	Рабочая среда		пар, вода, пароводяная смесь, азот
13.	Время срабатывания: открытие; закрытие.	с с	не более 2 не более 5

Таблица 2

Характеристики рабочей среды

№ п/п	Наименование параметра	Единица физической величины	Значение
1.	Физическое состояние: насыщенный пар; пароводяная смесь; вода		
2.	Параметры при нормальной эксплуатации: давление температура радиоактивность концентрация борной кислоты (H ₃ BO ₃)	МПа °C Ки/дм ³ г/кг	15,7 346 1,5×10 ⁻² не более 16
3.	Параметры при гидравлических испытаниях: давление температура	МПа °C	24,7 100...130

Нормы качества рабочей среды

Нормы качества рабочей среды должны соответствовать отраслевому нормативному документу:

Теплоноситель первого контура ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000. Технические требования к качеству. Способы обеспечения. ГНД95.1.06.02.001-97.

Параметры окружающей среды

Таблица 3

Параметры окружающей среды

N п/п	Наименование параметра	Единица физической величины	Значение
1.	Условия нормальной эксплуатации: -температура -абсолютное давление -относительная влажность (при 45 °C)	°C МПа %	45 0,1 75
2.	В аварийных условиях (в режиме «малая течь»): -температура -абсолютное давление -относительная влажность (при 90 °C) -длительность эксплуатации в аварийных условиях	°C МПа % час	90 0,12 100 12
3.	В режиме «большая течь»: -температура -абсолютное давление -относительная влажность	°C МПа %	До 150 0,49 100

Требования к конструкции

Конструкция ИПУ должна предусматривать:

- открытие и обратную посадку предохранительной арматуры в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-008-89 ($P_{отк.}=190(185)\text{кгс/см}^2$, $P_{закр.}=174(170)\text{кгс/см}^2$);
- возможность управления, принудительного открытия и закрытия предохранительного клапана во всем диапазоне давлений первого контура, от рабочего приблизительно до $4\text{-}5\text{кгс/см}^2$, с БЦУ и РЦУ;
- отключающее или блокирующее устройство любого ИК в случае его непосадки после открытия;
- сигнализацию положения главного клапана и импульсных клапанов или электромагнитных клапанов, подающих управляющую среду, как на БЦУ, так и на РЦУ;
- возможность поднастройки в пределах $\pm 7\%$ от рабочего давления;
- возможность проверки функциональной способности (исправности) действия предохранительной арматуры, в том числе схем управления, с выбросом рабочей среды, без поднятия давления в первом контуре до давления срабатывания;
- возможность проверки настройки схем управления предохранительной арматурой без срабатывания и без поднятия давления в первом контуре;
- возможность проверки настройки пружины импульсного клапана без подъема давления в первом контуре до давления срабатывания;
- исключение возможности несанкционированного изменения настройки пружины и других элементов регулировки;
- возможность блокирования предохранительного клапана во время гидроиспытаний;
- возможность контроля герметичности затвора предохранительного клапана (система контроля наличия протечек) с использованием температурных или акустических датчиков;
- конструкция предохранительного клапана должна предусматривать возможность многократного выполнения гидравлических испытаний при давлении $24,7\text{МПа}$ (250кгс/см^2) и температуре не менее 100°C ;
- в конструкции ИПУ должно быть исключено применение в качестве элементов присоединения трубопроводов к главному клапану резьбовых штуцерных соединений, должны применяться сварные или фланцевые соединения;
- сохранение работоспособности при скорости разогрева и охлаждения до 150°C в час (не менее 2000 циклов разогрева и охлаждения);
- сохранение прочности, герметичности и работоспособности в пределах значений, установленных в ТУ, во время и после сейсмического воздействия силой 7 баллов по шкале MSK-64 (МРЗ для площадки Запорожской АЭС).

Сейсмическая нагрузка с учетом одновременного воздействия в горизонтальном и вертикальном направлении в месте установки предохранительного клапана и высотной отметки клапана (не более 35 м) составляет:

- ускорение в произвольном горизонтальном направлении – $4g$;
- ускорение в вертикальном направлении – $2.5g$.

Сейсмопрочность арматуры подтверждается расчетным (по ПНАЭ Г-7-002-86) или экспериментальным путем. Если предохранительный клапан управляется с помощью механизированного (электромагнитного, гидравлического, пневматического или другого) привода, то приводная система должна быть полностью аттестована на сейсмоустойчивость.

ИПУ должен быть аттестован на работу в режиме сброса насыщенного пара, пароводяной смеси и холодной воды.

Гарантированное число рабочих циклов (открыто-закрыто) на рабочих параметрах за период 4 года (30000 часов) – 200 циклов.

Конструкция элементов ИПУ должна обеспечивать полную дренируемость рабочей среды.

Конструкция ИПУ должна позволять удаление всех наслоений, продуктов коррозии, пыли и других примесей.

ИПУ должны допускать возможность промывки внутренних и наружных поверхностей дезактивирующими растворами, а также орошение раствором борной кислоты от спринклерной системы.

Требования к конструкции главного клапана

Конструкция клапана должна предусматривать установку клапана в существующие трубопроводы подвода и сброса среды.

Тип присоединения главного клапана к трубопроводам подвода среды – сварка.

Конструкция главного клапана должна допускать выполнение всех видов ремонта без вырезки клапана из трубопровода.

Требования к управляющей системе ИПУ

Система управления должна обеспечивать возможность принудительного открытия-закрытия ИПУ от ключей управления БЦУ и РЦУ.

Управляющая система, выдающая управляющий сигнал «открытие-закрытие» ИПУ, как результат обработки средств измерения давления, должна быть не менее, чем трехканальной и получать сигналы измерения давления не менее, чем от трех устройств измерения давления.

Для предотвращения ложного срабатывания предохранительного клапана в случае возможного выхода из строя одного канала управляющей системы, система управления должна выдавать управляющий сигнал на «открытие-закрытие» главного клапана при достижении уставки срабатывания двух из трех каналов управляющей системы (принцип «2 из 3-х»).

Руководствуясь требованием «Общих положений обеспечения безопасности атомных станций» НП 306.1.02/1.034-2000, п.5.5.4 – «Многоканальность системы и независимость каналов заключается в том, что любые единичные отказы в управляющей системе и отказ (в том числе и по общей причине) не должны нарушать ее работоспособности. Многоканальность подразумевает наличие не менее двух независимых каналов. Каналы независимы, если у них нет общих входных сигналов и выходные сигналы не объединяются. Для достижения полной независимости каналов используются различные принципы (срабатывание по разным параметрам, использование разных детекторов и т.п.)». Установлено требование: отказ системы управления ИПУ не должен приводить к отказу системы защиты первого контура от превышения давления и невыполнению функции безопасности.

Конструкция системы управления ИПУ должна исключать несанкционированное изменение настройки.

В случае применения в качестве управляющей системы главным клапаном импульсного клапана, конструкция импульсного клапана должна исключать ложное открытие главного клапана в случаях повышенной протечки через затворы импульсного клапана.

Управляющая система должна предусматривать возможность поднастройки в пределах $\pm 7\%$ от рабочего давления.

Конструкция предохранительной арматуры должна предусматривать возможность проверки ее исправного действия путем открытия с пульта управления. У импульсно-

предохранительных устройств это требование относится к импульсному клапану. В случае невозможности проверки действия предохранительной арматуры на работающем оборудовании должны применяться переключающие устройства, устанавливаемые перед арматурой и позволяющие проводить проверку каждой из них с отключением от оборудования. Переключающие устройства должны быть такими, чтобы при любом их положении с оборудованием или трубопроводами было соединено столько единиц арматуры, сколько требуется, чтобы обеспечить выполнение требования:

«Давление в защищаемом оборудовании и трубопроводе при срабатывании предохранительной арматуры не должно превышать рабочее на 15% (с учетом динамики переходных процессов в оборудовании и трубопроводах, и динамики и времени срабатывания предохранительной арматуры) и не вызывало недопустимых динамических воздействий на предохранительную арматуру».

Требования надежности

Для характеристики показателей надежности предохранительного клапана рассматриваются следующие виды отказов:

- отказ на открытие – НТ;
- самопроизвольное срабатывание – СС;
- незакрытие после срабатывания – НС;
- невыполнение принудительного открытия – НП;
- невозможность настройки давления открытия в пределах не менее $\pm 7\%$ - НН;
- нарушение настройки давления открытия – РН;
- самопроизвольное открытие в режиме гидроиспытаний парогенератора и паропроводов – СГ;
- отклонение времени открытия закрытия сверх установленных пределов – НВ;
- отсутствие индикации положения главного клапана – НФ.

Конструкция клапана должна обеспечивать вероятность безотказной работы (по видам отказов: НТ, СС, НС, НВ) при срабатывании 25 циклов за 4 года не менее 0,995.

Доверительная вероятность для расчета нижней границы вероятности безотказной работы – 0,95.

Средняя наработка на отказ (по видам отказов: НП, РН, НН, НФ) в режиме ожидания не менее 100000 часов.

Срок службы выемных частей и комплектующих изделий ИПУ – 10 лет, срок службы корпусных деталей – 30 лет.

Эксплуатационный ресурс до капитального ремонта – не менее 10 лет.

Список литературы

1 (320.00.00.00.000 Дб1. Реакторная установка В-320. Техническое обоснование безопасности реакторной установки. ОКБ ГП.1987).

2 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» НП 306.1.02/1.034-2000.