

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ БЫСТРЫХ НАТРИЕВЫХ РЕАКТОРОВ

В.В. Борисов, А.А. Камаев, О.И. Мяздрикова, С.А. Михин,
И.А. Пахомов, С.В. Перевозников

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

249033, Калужская обл. г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1



На примере отечественных быстрых реакторов БН-350, БН-600 и БН-800 проанализирована эволюция технических решений по системе автоматической защиты парогенераторов «натрий-вода» (САЗ ПГ). Представлены структурные схемы и основные характеристики оборудования САЗ ПГ перечисленных реакторов. Проанализирована эффективность САЗ в условиях реальных течей в ПГ реакторов БН. Рассмотрены вопросы разработки и создания САЗ ПГ проектируемых установок БН-1200 и ИЯУ МБИР.

Ключевые слова: натриевый теплоноситель, парогенератор «натрий-вода», система защиты парогенератора, течи воды в натрий, межконтурная неплотность, система контроля «малых» течей, «большая» течь.

Для цитирования: Борисов В.В., Камаев А.А., Мяздрикова О.И., Михин С.А., Пахомов И.А., Перевозников С.В. Принципы построения и развитие системы автоматической защиты парогенераторов быстрых натриевых реакторов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 5-18. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.01>.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие быстрых реакторов в мире охватывает период около 70-ти лет. Наиболее продуманная и последовательная программа их развития была выполнена в нашей стране, причем с самого начала приоритет был отдан быстрым реакторам с натриевым охлаждением [1].

Система аварийной (автоматической) защиты парогенератора – САЗ ПГ – предназначена для обеспечения безопасной эксплуатации РУ БН при разгерметизации теплообменной поверхности парогенераторов натрий-вода.

© В.В. Борисов, А.А. Камаев, О.И. Мяздрикова, С.А. Михин, И.А. Пахомов, С.В. Перевозников, 2023

Основные задачи САЗ ПГ:

- обнаружение и локализация течи воды в натрий;
- вывод из работы аварийного парогенератора (или секции);
- защита от превышения допустимого давления парогенератора, оборудования и трубопроводов второго натриевого контура.

СИСТЕМА АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ РЕАКТОРА БН-350

На БН-350 установлены ПГ с естественной циркуляцией теплоносителя по третьему контуру двух типов [2–6]:

- ПГ с теплообменными трубками Фильда (ПГФ);
- ПГ «Надежность» модульного типа чехословацкого производства (ПГН).

Парогенератор ПГФ состоит из двух секций, параллельно включенных по натриевому и пароводяному контурам, бака сепаратора и соединительных трубопроводов (рис. 1). Каждая секция включает в себя один пароперегреватель и один испаритель. Испаритель выполнен в виде вертикального сосуда с естественной циркуляцией воды внутри трубок Фильда.

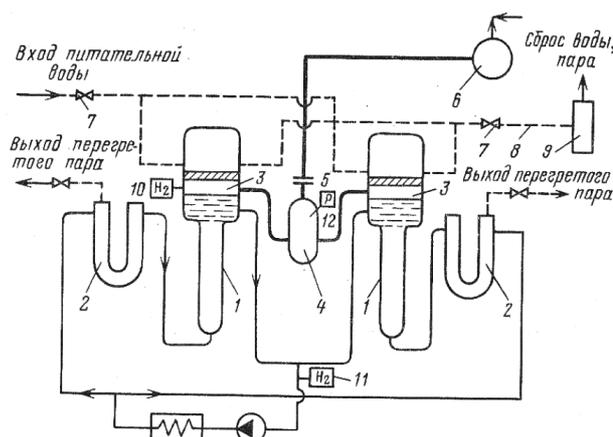


Рис. 1. Схема САЗ ПГ с трубками Фильда: 1 – испаритель; 2 – пароперегреватель; 3 – газовый объем; 4 – сепаратор первой ступени; 5 – предохранительная мембрана в газовой полости; 6 – сепаратор второй ступени; 7 – быстродействующая пароводяная арматура; 8 – линия аварийного сброса воды; 9 – расширитель; 10 – индикатор водорода в газе; 11 – индикатор водорода в натрии; 12 – индикатор давления в газовой полости

Парогенератор ПГН симметричный, модульный, состоит из двух секций, в каждую из которых входят модули испарителя и перегревателя (рис. 2). Каждый модуль включает в себя 16 микромодулей. В состав ПГН входит буферная емкость (БЕ).

Парогенераторы БН-350 можно отнести к парогенераторам интегрального типа, поскольку все его натриевые и пароводяные коммуникации объединены в один объем без разделяющей арматуры между ними.

Случаи течей воды в натрий, имевшие место в 1973–1975 гг. в парогенераторах АЭС БН-350, дали возможность получить уникальные данные по характеру поведения всех систем в аварийных условиях, в частности, по работе систем контроля герметичности теплообменной поверхности и аварийной защите (САЗ).

Наиболее существенным результатом эксплуатации парогенераторов БН-350 является вывод о том, что работа с течами воды в натрий невозможна, так как они достаточно быстро (в зависимости от условий – минуты или часы) развиваются из малых течей, определяемых только системами контроля, в большие течи, приводящие к

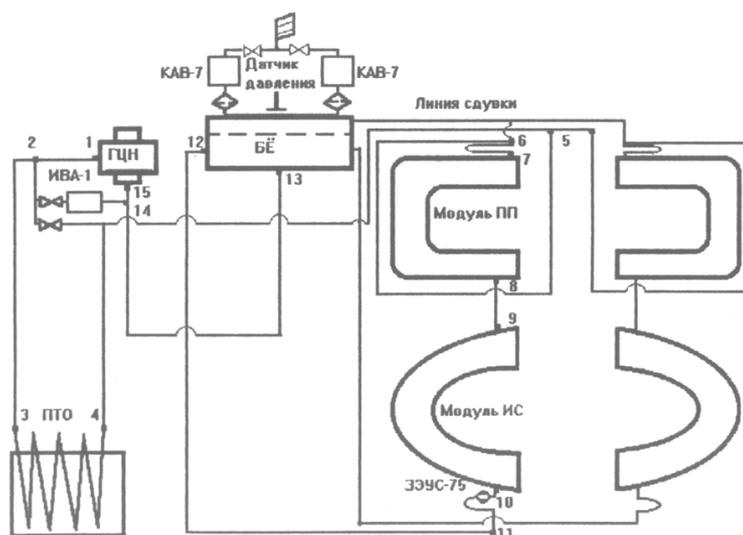


Рис. 2. Принципиальная схема ПГ «Надежность» и расположение устройств системы индикации течи воды в натрий

быстрому росту давлений и температур во втором контуре и аварийному отключению парогенераторов. Этот результат имел серьезные последствия, ибо при проектировании БН-350, в частности, при выборе инерционности и чувствительности систем контроля водорода в натрии и газе и пропускной способности аварийных сбросных устройств, исходили из возможности работы оборудования в течение какого-то времени при наличии небольшой течи воды в натрий.

Система защиты парогенератора БН-350 спроектирована на основании принципа, что при возникновении аварийной ситуации в любом модуле испарителя или перегревателя весь парогенератор отключается и выводится из работы. Система защиты состоит из трех основных подсистем:

- подсистема формирования аварийного сигнала;
- подсистема защиты по пароводяному контуру;
- подсистема защиты по натриевому контуру.

Формирование аварийного сигнала в системе защиты парогенератора происходит в зависимости от величины течи одним из следующих способов:

- в режиме большой течи, когда наблюдаются значительные гидродинамические эффекты в натриевом контуре, аварийный сигнал формируется по повышению давления в газовой полости парогенератора; в случае большой течи аварийные процессы весьма скоротечны, поэтому срабатывание отсекающих и предохранительных устройств происходит автоматически;
- при малой течи воды в натрий аварийный сигнал формируется по изменению концентрации водорода в натрии или газовых полостях второго контура; в этом случае момент приведения в действие системы аварийной защиты определяется эксплуатационным персоналом.

Назначение подсистемы защиты парогенератора по пароводяному контуру состоит в быстрейшем осушении пароводяного объема по аварийному сигналу и предотвращении попадания натрия в пароводяной контур.

В задачи подсистемы защиты парогенератора по натриевому контуру входят локализация аварии, удержание ее параметров в допустимых пределах и обеспечение сброса и сепарации продуктов реакции за пределы парогенератора.

Система аварийной защиты двух типов парогенераторов практически идентична. Индикация малых течей в парогенераторах осуществляется с использованием следующих устройств:

- ИВА-1 – измерение концентрации водорода в натрии (ПГФ и ПГН) в пределах 0.05–1.0 ppm;
- КАВ-7 – измерение концентрации водорода в газовой полости испарителя (ПГФ) и буферной емкости (ПГН) в пределах 0.001–50% об.;
- ЗЗУС-75 – контроль относительного изменения расхода натрия через секцию (только ПГН), чувствительность к течи воды в натрий 0,1 г/с.

В случае малой течи при достижении содержания водорода в натрии или в газовой полости определенной величины

- нажатием кнопки «осушение парогенератора» открывается быстродействующий клапан на линии аварийного осушения пароводяного объема;
- закрывается отсечная арматура на линиях питательной воды, перегретого пара и непрерывной продувки;
- момент отключения ГЦН выбирается из условия скорейшего выпаривания воды из парогенератора.

Индикация больших течей осуществляется с помощью датчиков давления, установленных в газовых полостях

- сепаратора первой ступени (ПГФ);
- буферной емкости (ПГН).

При большой течи, когда происходит увеличение давления в газовом объеме парогенератора до определенной величины (аварийной уставки), выдается аварийный сигнал, по которому

- принудительно разрушаются предохранительные мембранные устройства по второму контуру (за газовой емкостью);

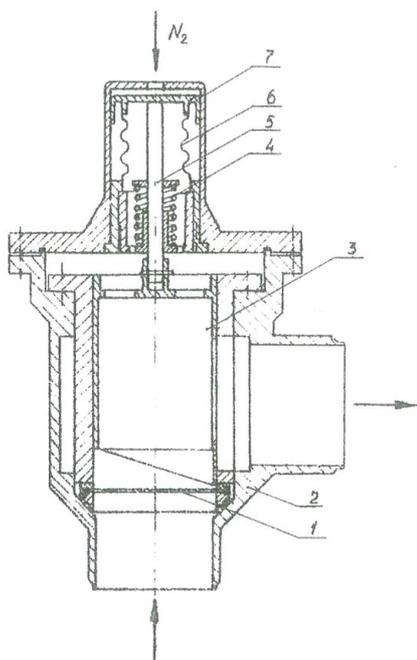


Рис. 3. Мембранно-разрывное устройство (МРУ): 1 – мембрана; 2 – корпус; 3 – нож; 4 – пружина; 5 – шток; 6 – сильфон; 7 – поршень

- открывается быстродействующий клапан на линии аварийного осушения пароводяного объема;

- закрывается быстродействующий клапан на линии подачи питательной воды;
- отключается ГЦН второго контура.

Подключение вышеуказанных устройств к ПГФ и ПГН приводится на рис. 1, 2 соответственно.

На ПГФ (на сепараторе первой ступени) и на ПГН (на буферной емкости) для защиты от превышения допустимого давления во втором натриевом контуре использовались предохранительные разрывные мембраны с принудительным подрывом МРУ (рис. 3).

По результатам пуско-наладочных работ МРУ подверглось серьезной конструктивной переработке – был изменен узел крепления мембраны. Четырехходовой распределитель, подающий азот на пневмопривод МРУ, был заменен на более надежный взрывной клапан.

Для сброса и сепарации продуктов реакции натрия с водой для двух типов ПГ при-

менена двухступенчатая система с двумя баками, сепарация продуктов в которых основана на изменении направления и скорости движения потока.

Для сброса газообразных продуктов реакции в атмосферу используется гидрозатвор совместно с клапаном обратного действия.

В подсистеме защиты по пароводяному контуру используется схема аварийного осушения в один общий расширитель. В схеме применяется быстродействующая арматура с электроприводом. Управление арматурой осуществляется персоналом в ручном режиме.

В период эксплуатации на парогенераторах ПГФ БН-350 произошло 12 инцидентов, связанных с течью воды в натрий [7]. Система аварийной защиты обрабатывала сигнал «большая течь» в автоматическом режиме при достижении величины давления, равной аварийной уставке [8]. Послеаварийные обследования показывали, что аварийный процесс локализовался в пределах зоны действия факела реакции первой дефектной трубки. Исключение составил один инцидент (ПГ-5, 16.02.1975 г.), когда после срабатывания САЗ из-за длительного поступления воды в натрий второго контура через дренажи воды трубный пучок дефектного испарителя был значительно разрушен.

Малые течи происходили в испарителях ПГФ в условиях достаточно низких температур натрия, когда течь наблюдалась в течение нескольких часов при медленном нарастании концентрации водорода в газовых полостях испарителей. Анализ таких режимов показал, что система индикации водорода в газе с индикатором КАВ-7 удовлетворительно справлялась с задачей обнаружения течей.

Известны два случая возникновения малых течей на ПГН-1 и ПГН-2 в январе 1989 г. [9], связанных с отклонениями в подготовке питательной воды. В одном случае в течение 30–35 минут наблюдался уверенный рост показаний индикатора ИВА-1, после чего было принято решение отключить парогенератор [10]. В другом случае произошло повреждение внешней стенки корпуса испарителя и вылив до 1 т натрия в короб ПГ [7].

Во всех случаях возникновения малых течей сквозных повреждений соседних труб обнаружено не было.

Опыт работы системы аварийной защиты БН-350 показывает, что существующая система обеспечивает надежную защиту корпусов парогенераторов и всего второго контура от избыточного давления. Во всех случаях даже при отказе устройств принудительного воздействия на мембраны и их самопроизвольном разрыве давление в полости второго контура не выходило за допустимые пределы. Так давление во втором контуре получается ниже расчетного (0,8 МПа) и при нормальной работе МРУ не превышает 0,3 МПа.

Одним из основных требований к САЗ является надежность и безотказность ее работы. В 1973–1975 гг. на БН-350 были три случая отказа отдельных элементов САЗ в аварийных ситуациях. Причины такого количества отказов заключались как в недостатках конструкций и схем, так и в недостаточно регулярной проверке аварийных устройств. Принятые меры, в частности, создание схемы для проверки цепи пиропатрона МРУ, регламентирование порядка и частоты проверок всей схемы и устройств САЗ ПГ, исключили повторение отказов.

Определенным недостатком схемы САЗ ПГ БН-350 является то, что в ней не полностью выдержано требование дублирования систем и устройств аварийной защиты, а дублирующие устройства там, где они есть, имеют значительно большие времена срабатывания, чем основные [5].

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ БОР-60

Одной из задач РУ БОР-60 является испытание крупномасштабных (до 30 МВт) модулей ПГ различных конструкций в реальных режимах работы АЭС. За время эксплуатации были испытаны корпусной змеевиковый парогенератор, микромодульный парогенератор (ЧССР), модель парогенератора ПГ Н-200М (для БН-600) [11, 12].

На рисунке 4 приведена теплотехническая схема РУ БОР-60 со змеевиковым и микромодульным ПГ, где представлены основные элементы САЗ ПГ.

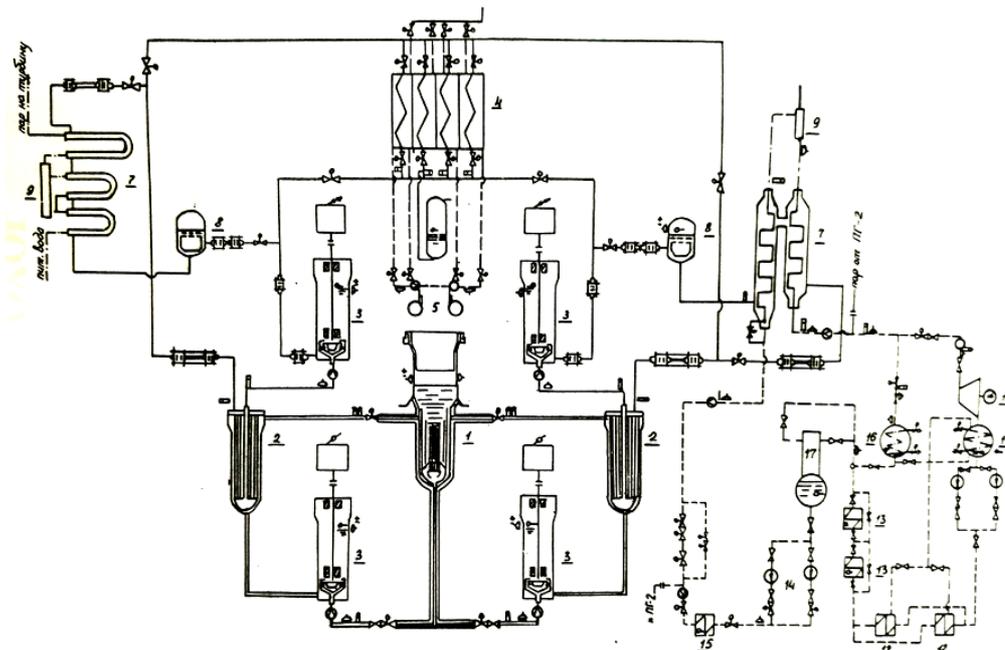


Рис. 4. Теплотехническая схема РУ БОР-60: 1 – реактор; 2 – теплообменник «натрий-натрий»; 3 – насос; 4 – теплообменник «натрий-воздух» (ВТО); 5 – вентиляторы ВТО; 6 – буферная емкость ВТО; 7 – парогенератор (ПГ); 8 – буферная емкость ПГ; 9 – сепаратор; 10 – турбогенератор; 11 – конденсатор турбины; 12 – эжектор; 13 – подогреватель низкого давления; 14 – питательный насос; 15 – подогреватель высокого давления; 16 – технологический конденсатор; 17 – деаэратор

В настоящее время на РУ БОР-60 используются обратные парогенераторы двух типов производства Чешской Республики [11]:

- секционно-модульный ОПГ-1, установленный на петле 1;
- модульный ОПГ-2, установленный на петле 2.

Контроль межконтурной неплотности в ОПГ-1 осуществляется с помощью приборов СОВА-3 (система обнаружения водорода в аргоне буферной емкости) и Zeus (сигнал от расходомеров, установленных на входе натрия в каждую из восьми секций и на выходе из них, расходомеры включены дифференциально). Дополнительно используются сигнализаторы разуплотнений сварных соединений трубок в двойных трубных досках со стороны натрия или воды (о протечках воды или пара сигнализирует манометр, о протечках натрия сигнализирует датчик типа свечи зажигания).

Контроль межконтурной неплотности в ОПГ-2 осуществляется с помощью приборов СОВА-3, установленных на буферной емкости, индикатора водорода в натрии ИВА-IV и расходомера DN200, установленных на выходе натрия из модуля.

На буферной емкости каждой петли осуществляется контроль давления аргона и установлены МРУ для защиты второго контура от превышения допустимого давления.

Сброс продуктов реакции натрия с водой осуществляется в бак-сепаратор и расположенные за ним ресиверы.

трия осуществляется с помощью приборов ИРИС/ТАРАН (вместо ИТИ и ИШИТ). Большие течи контролируются так же, как на БН-600 датчиками давления в защитном газе и секционными расходомерами. При формировании сигнала «Малая течь» происходит автоматическое отключение аварийной секции, а при формировании сигнала «Большая течь» автоматически отключается петля.

Схема САЗ ПГ РУ БН-800 приведена на рис. 6.

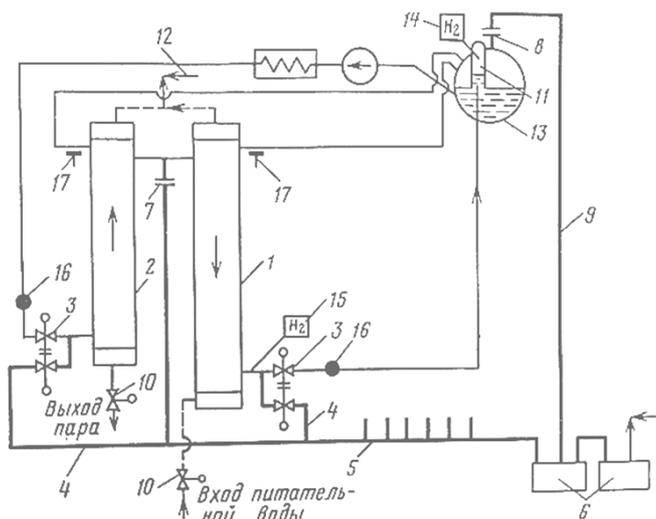


Рис. 6. Схема САЗ ПГ Н-272 РУ БН-800: 1 – испаритель; 2 – пароперегреватель; 3 – быстродействующая натриевая арматура; 4 – линии сброса продуктов реакции; 5 – сбросной коллектор; 6 – сепараторы первой и второй ступеней; 7 – мембрана натриевая; 8 – мембрана газовая; 9 – дублирующая сбросная линия; 10 – быстродействующая арматура по воде (пару); 11 – секционная газовая полость; 12 – импульсное предохранительное устройство по воде (пару); 13 – буферная емкость; 14 – контроль водорода в газе; 15 – контроль водорода в натрии; 16 – натриевые расходомеры; 17 – индикаторы пузырьков газа в натрии

В начальный период эксплуатации на РУ БН-600 на ББН (бак буферный натриевый) для защиты от превышения давления во втором натриевом контуре устанавливались предохранительные разрывные мембраны с принудительным подрывом, аналогичные мембранам БН-350. Затем эти устройства были заменены на устройства с хлопающими мембранами полностью пассивного действия (УПМ), показавшими хорошие эксплуатационные характеристики.

Предохранительные устройства на ББН РУ БН-800 содержат две последовательно установленные хлопающие мембраны с целью устранения влияния противодействия со стороны сосуда аварийного сброса первой ступени на величину давления срабатывания этих устройств. Кроме того на ПГ Н-272 на модулях испарителей каждой секции установлены натриевые УПМ.

Для сброса и сепарации продуктов реакции натрия с водой на РУ БН-600 и РУ БН-800 применена двухступенчатая система сепарации с двумя баками, подобно системе сброса и сепарации установки БН-350, но с измененными характеристиками:

- для БН-600 значительно (до 50 м³) увеличены объемы баков аварийного сброса первой и второй ступеней;
- для БН-800 сосуд аварийного сброса первой ступени выполняет дополнительно функцию приемки натрия, а объем сосуда аварийного сброса второй ступени уменьшен до 10 м³.

За сосудом второй ступени установлено мембранное предохранительное устройство.

На БН-800 по третьему контуру помимо секционной отсечной арматуры для быстрого сброса давления из отсеченной секции используются импульсные предохранительные устройства (ИПУ), установленные в рассечке слабоперегретого пара каждой секции.

На БН-600 в начальный период эксплуатации зафиксировано 12 случаев течи воды в натрий в парогенераторах [7]. Во всех случаях парогенераторы успешно были выведены из работы. Однако в двух из них исходная течь успевала развиться до большой течи, что приводило к срабатыванию предохранительных мембран на БН.

На БН-800 инцидентов, связанных с течью воды в натрий, не происходило с начала эксплуатации до настоящего времени.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРА БН-1200М

Парогенераторы БН-1200М, состоящие из двух параллельно подключенных модулей, можно отнести к парогенераторам интегрального типа, поскольку все их натриевые коммуникации объединены в один объем без разделяющей арматуры между ними.

В подсистеме контроля малых течей САЗ ПГ БН-1200М предполагается использовать контрольно-измерительные блоки на основе твердоэлектродных электрохимических датчиков кислорода (ИКН) и водорода (ИВН) в натрии и приборы ИРИС/Таран-Тм, регистрирующие газовые включения в потоке натрия. В качестве одного из вариантов рассматривается дифференциальная схема формирования сигнала «Межконтурная неплотность парогенератора» (МНПГ), повышающая чувствительность подсистемы к величине течи. Однако использование парогенератора Н-532 с относительно низкой по сравнению с проектом Н-485М скоростью натрия в межтрубном пространстве снижает эффективность контроля малых течей.

Для контроля больших течей предполагается использовать расходомеры DN40, установленные на специальных линиях сдувок и отбора натрия, и (или) расходомерный канал прибора ИРИС/Таран-Тм. Возможно применение датчиков давления в газовых компенсаторах объема. Чувствительность этих методов контроля к величине течи еще предстоит исследовать.

Гидравлически второй натриевой контур РУ БН-1200М существенно отличается от контуров РУ БН-600 и БН-800 – в циркуляционной схеме отсутствует последовательно включенный компенсационный газовый объем [13, 14]. Для защиты оборудования и трубопроводов второго контура от превышения допустимого давления и компенсации температурного расширения теплоносителя байпасно основному контуру через специальные трубопроводы подключен относительно небольшой бак с уровнем натрия и газовой полостью. По газу бак соединен с газовой полостью сосуда аварийного сброса первой ступени (САС-1). Кроме того на входе и выходе из модулей ПГ установлены газовые компенсаторы объема, а на модулях ПГ – натриевые предохранительные мембранные устройства (УПМ). Такое решение, хоть и обеспечивает защиту от превышения допустимого давления, но усложняет как саму схему, так и эксплуатацию САЗ ПГ.

Следует отметить недостатки в компоновочных решениях по второму натриевому контуру – давление в нижней точке ПТО при работе на номинальном уровне мощности близко к значению максимального допустимого давления.

Влияние применяемой технологии заделки труб в трубной доске на надежность ПГ еще предстоит оценить. Однако снижение барьеров в месте контакта труб с трубной доской между натрием и водой надежность не повышает. Стоит отметить, что подавляющее большинство течей воды в натрий в парогенераторах отечественных БН имели место в местах заделки труб в трубные доски. Ссылаться на безаварийную

эксплуатацию ПГ БН-600 не получится, так как материал и технология изготовления существенно образом отличаются.

Уменьшено количество отсечной пароводяной арматуры (по сравнению с секционными ПГ), так как при возникновении и обнаружении межконтурной неплотности в одном из модулей ПГ должна отключаться вся аварийная петля.

Для сброса и сепарации продуктов реакции натрия с водой применена двухступенчатая схема с САС-1 и САС-2. На трубопроводе между двумя этими сосудами установлены мембранные предохранительные устройства (УПМ) в соответствии с нормативными требованиями.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОБРАТНОГО ПГ ИЯУ МБИР

В ИЯУ МБИР предполагается использование обратных парогенераторов (ОПГ) интегральной компоновки, состоящих из трех модулей, аналогичных модулю ОПГ-2 установки БОР-60.

В составе системы контроля межконтурной течи (СКМТ) ОПГ планируется применить (в расчете на одну петлю)

- датчик контроля водорода, растворенного в натрии, ЭХДВ-Н (1 шт.);
- датчики контроля газообразного водорода в потоке натрия ИРИС/Таран-Тм (по 1 шт. на каждом модуле);
- датчик контроля газообразного водорода в защитном газе ББН ЭХДВ-Г (1 шт.) с конвективной петлей;
- датчики контроля давления в защитном газе ББН (3 шт.);
- устройства контроля расхода натрия на выходе из модулей ОПГ DN300 (3 шт.).

Для защиты второго контура и ОПГ от превышения допустимого давления на ББН и на САС-1 установлены газовые УПМ, а на входе натрия в каждый модуль ОПГ – натриевые УПМ.

Для сброса и сепарации продуктов реакции натрия с водой применена двухступенчатая система в составе САС-1 и САС-2 с УПМ на трубопроводе между ними.

Пароводяная арматура обеспечивает отсечение каждого ОПГ по третьему контуру.

Предполагается, что система автоматической защиты ОПГ ИЯУ МБИР будет работать полностью в автоматическом режиме.

В таблице 1 обобщены данные о технических решениях по САЗ ПГ описанных выше отечественных реакторов БН.

Таблица 1

Технические решения по САЗ ПГ отечественных реакторов БН

Установка	БН-350		БОР-60	
	2	3	4	5
ПГ	ПГФ	ПГН	ОПГ-1	ОПГ-2
Тип	Интегральный	Интегральный	Секционно-модульный	Модульный
Н в Na	ИВА-1	ИВА-1	-	ИВА-IV
О в Na	-	-	-	-
H ₂ в Na	-	-	-	-
H ₂ в Ar	КАВ-7 ИС	КАВ-7 БЕ	СОВА-3	СОВА-3
P в Ar	сепаратор 1 ступени	БЕ	БЕ	БЕ

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5
G _{Na}	ЗЭУС-75		ZEUS	DN200
Отключение	БТ – авт. МТ – ручн.	БТ – авт. МТ – ручн.	БТ – авт. МТ – ручн.	БТ – авт. МТ – ручн.
Предохранительные устройства	МРУ (сепаратор 1 ступени)	МРУ (БЕ)	МРУ (БЕ)	МРУ (БЕ)
Натриевая арматура	–	–	Вход БЕ (выход) ПГ	Вход БЕ (выход) ПГ
Пароводяная арматура	Вход (выход) ПГ	Вход (выход) ПГ	Вход (выход) ПГ	Вход (выход) ПГ
Система сброса	Сепараторы 1 и 2 ступени	Сепараторы 1 и 2 ступени	Сепараторы 1 и 2 ступени	Сепараторы 1 и 2 ступени
Установка	БН-600	БН-800	БН-1200М	МБИР
ПГ	Н-200М	Н-272	Н-532	ОПГ-2
Тип	Секционный	Секционный	Интегральный	Интегральный
Н в Na	ИВА-1	ЭХДВ-Н	ИВН	ЭХДВ-Н
О в Na	–	–	ИВК	–
H ₂ в Na	ИТИ ИШИТ	ИРИС/Таран	ИРИС/Таран	ИРИС/Таран
H ₂ в Ar	КАВ-7	ЭХДВ-Г	–	ЭХДВ-Г
P в Ar	БЕ	БЕ	–	БЕ
G _{Na}	DN300	DN300	DN40	DN300
Отключение	БТ – авт. МТ – ручн.	БТ – авт. МТ – авт.	БТ – авт. МТ – авт.	БТ – авт. МТ – авт.
Предохранительные устройства	МРУ/УПМ (БЕ)	УПМ (БЕ)	УПМ (САС-1)	УПМ (БЕ)
Натриевая арматура	Вход (выход) секция ПГ	Вход (выход) секция ПГ	–	–
Пароводяная арматура	Вход (выход) секция ПГ	Вход (выход) секция ПГ ИПУ	Вход (выход) ПГ ИПУ	Вход (выход) ПГ
Система сброса	Сепараторы 1 и 2 ступени	Сепараторы 1 и 2 ступени	Сепараторы 1 и 2 ступени	Сепараторы 1 и 2 ступени
БТ – большая течь; МТ – малая течь; БЕ – буферная емкость; ИС – модуль испарителя				

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведено описание концепции построения САЗ ПГ реакторов типа БН, основные положения которой были апробированы при создании и эксплуатации реактора БН-350. На примере отечественных реакторов БН-350, БН-600, БН-800, БОР-60, МБИР и БН-1200М дана развернутая характеристика тенденций развития САЗ ПГ.

Литература

1. Поплавский В.М. Быстрые реакторы. Состояние и перспективы. // Атомная энергия. – 2004. – Т. 96. – Вып. 5. – С. 327 – 335.
2. Поплавский В.М., Козлов Ф.А. Безопасность парогенераторов натрий-вода. – М.: ЭНЕРГО-АТОМИЗДАТ, 1990. – 140 с. ISBN 5-283-03775-4.
3. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. – М.: ИздАТ, 2012. – 632 с. ISBN 978-5-86656-257-2.
4. Баклушин Р.П. Эксплуатационные режимы АЭС. – Издательский дом МЭИ, 2012. – 532 с. ISBN 978-5-383-00641-2.
5. Баклушин Р.П., Болгарин В.И. и др. Модернизация и опыт работы системы аварийной защиты парогенераторов БН-350. / Сб. докладов. Семинар стран-членов СЭВ «Опыт разработки и эксплуатации парогенераторов быстрых реакторов». – Димитровград, 1982 – С. 226.
6. Антуфьев О.Н., Баклушин Р.П. и др. Опыт эксплуатации парогенераторов БН-350 / Сб. докладов. Семинар стран-членов СЭВ «Опыт разработки и эксплуатации парогенераторов быстрых реакторов». – Димитровград, 1982 – С. 82.
7. Ташлыков О.Л., Бельтюков А.И. Парогенераторы АЭС: учебник. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2019. – 304 с. ISBN 978-5-7996-2675-4.
8. Артемихин В.Г. и др. Анализ работы систем контроля и защиты парогенераторов БН-350 при течах воды в натрий. / Доклад на советско-французском семинаре «Технологическая схема, конструкция и опыт эксплуатации систем контроля и аварийной защиты парогенераторов натрий-вода». Обнинск, 1979.
9. Троянов М.Ф., Ринейский А.А. Состояние работ по быстрым реакторам в Российской Федерации. / XXV Ежегодное совещание Международной рабочей группы МАГАТЭ по быстрым реакторам. Вена, 27-30 апреля 1992 г.
10. Conceptual designs of advanced fast reactors. IAEA-TECDOC-907. IAEA. Vienna, October 1996, 248 p.
11. Цыканов В.А. и др. Результаты ресурсных испытаний и экспериментальных исследований крупномасштабных моделей парогенераторов на установке БОР-60 / Доклад на семинаре стран – членов СЭВ «Опыт разработки и эксплуатации парогенераторов быстрых реакторов», Димитровград, 1982.
12. Fast reactor database / IAEA-TECDOC-866, IAEA, Vienna, February 1996, 218 p.
13. Васяев А.В. и др. АЭС с РУ БН-1200М. Проектно-конструкторские решения, переход к их практической реализации. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2022. Вып. 4. С.75-85.
14. Ершов В.Н., Шепелев С.Ф. Энергоблок с РУ БН 1200М / Сб. докладов отраслевой конференции «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах». Томск, 11-12 октября 2018. С. 168-176.

Поступила в редакцию 30.08.2023

Авторы:

Борисов Вячеслав Владимирович, главный специалист,

E-mail: vvborisov@ipre.ru

Камаев Алексей Альфредович, начальник департамента, канд. техн. наук,

E-mail: kamaev@ipre.ru

Михин Степан Андреевич, инженер-исследователь,

Email: samikhin@ipre.ru

Мяздрикова Ольга Игоревна, младший научный сотрудник,

E-mail: okorzun@ipre.ru

Пахомов Илья Александрович, начальник лаборатории,

E-mail: iarakhomov@ipre.ru

Перевозников Сергей Владимирович, старший научный сотрудник,

E-mail: perev@ipre.ru

UDC 621.039.5

Principles of Construction and Development of an Automatic Protection System for Steam Generators of Fast Reactors

Borisov V.V., Kamaev A.A., Myazdrikova O.I., Mikhin S.A., Pakhomov I.A.,
Perevoznikov S.V.

IPPE JSC

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

On the example of domestic fast reactors BN-350, BN-600, BN-800, the evolution of technical solutions for the automatic protection system of sodium-water steam generators (SAZ SG) is analyzed. The structural diagrams and main characteristics of the SAZ SG equipment of listed reactors are presented. The effectiveness of SAZ in conditions of real leaks in steam generators of BN reactors is analyzed. The issues of development and creation of SAZ SG of designed BN-1200 INU MBIR are considered.

Key words: sodium coolant, sodium-water steam generator, steam generator protection system, water leaks into sodium, inter-circuit leakiness, control system for «small» leaks, «large» leak.

For citation: Borisov V.V., Kamaev A.A., Myazdrikova O.I., Mikhin S. A., Pakhomov I.A., Perevoznikov S.V. Principles of Construction and Development of an Automatic Protection System for Steam Generators of Fast Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 3, pp. 5-18; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.01> (in Russian).

REFERENCES

1. *Poplavskii V.M.* Fast reactors. Status and prospects. – Atomic energy, 2004, v. 96, iss. 5, pp. 301—307. DOI:10.1023/B:ATEN.0000038094.56394.e6
2. *Poplavskii V.M., Kozlov F.A.* Safety of sodium-water steam generators. ENERGOATOMIZDAT. Moscow, 1990. – P. 144. ISBN 5-283-03775-4 (In Russian).
3. *Kuznetsov I.A., Poplavskii V.M.* Safety of nuclear power plants with fast neutron reactors. Izdat, Moscow, 2012. – P. 632. ISBN 978-5-86656-257-2 (In Russian).
4. *Bakluschin R.P.* Operating modes of nuclear power plants. Publishing House MEI, 2012. – P. 531. ISBN 978-5-383-00641-2 (In Russian).
5. *Bakluschin R.P., Bolgarin V.I., Levitin V.L., Poplavskii V.M.* Modernization and experience the BN-350 steam generator emergency protection system. / Collection of reports. Seminar of COMECON member countries. «Experience in the development and operation of fast reactor steam generators». Dimitrovgrad, 1982. – P. 226 (In Russian).
6. *Antufyev O.N., Artemikhin V.G., Bakluschin R.P., Bolgarin V.I., Vasilenko K.T., Poplavskii V.M., Samarkin A.A.* Operational experience of BN-350 steam generators. / Collection of reports. Seminar of COMECON member countries. «Experience in the development and operation of fast reactor steam generators». Dimitrovgrad, 1982. – P. 82 (In Russian).
7. NPP steam generators: textbook / *Tashlykov O.L., Beltyukov A.I.* – Ekaterinburg : Ural Univers. Publishing House, 2019. P. 304. ISBN 978-5-7996-2675-4 (In Russian).
8. *Artemikhin V.G.* Analysis of the operation of BN-350 steam generator control and protection systems when water leaks into sodium. / Report on the Soviet-French seminar «Technological scheme, design and operational experience of control and emergency protection systems of sodium-water steam generators». Obninsk, 1979 (In Russian).

9. *Trojanov M.F., Rinejsky A.A.* Status of work on fast reactors in RF / 25th annual meeting of International Working Group on fast reactors of IAEA, Vienna, 27-30 April 1992.

10. Conceptual designs of advanced fast reactors. IAEA-TECDOC-907. IAEA. October 1996. P. 248.

11. *Tsikanov V.A., Buy V.F., Kondratyev V.I., Nechaev B.N., Nikolsky R.V., Privalov Yu.V., Sroelov V.S., Chernobrovkin Yu.V., Dubshek F., Tomesh V., Matal O., Shrutek J., Kugler V.* Results of resource tests and experimental studies of large-scale models of steam generator at the installation BOR-60. / Report on Seminar of COMECON member countries. «Experience in the development and operation of fast reactor steam generators». Dimitrovgrad, 1982.

12. Fast reactor database/ IAEA – TECDOC – 866, IAEA. VIENNA. February 1996.

13. *Vasyaev A.V., Gulevich A.V., Dyagilev A.M., Egorov C.V., Kamaev A.A., Kereksha A.V., Marova E.V., Peregudov A.A., Troyanov V.M., Shepelev S.F., Yashkin A.V.* NPP with reactor BN-1200M. Design solutions, transition to their practical implementation. VANT. Ser.: Nuclear reactor constants. 2022, iss. 4, pp. 75-85.

Available at: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2022/issue2022-4-75-85.pdf> (in Russian).

14. *Ershov V.N., Shepelev S.F.* Power unit with reactor BN-1200M. / Collection of reports. The industry conference «Closure of the fuel cycle of nuclear power based on fast neutron reactors». Tomsk, 11–12 October 2018, pp. 168-176 (in Russian).

Authors

Vyacheslav V. Borisov, Chief Specialist,

E-mail: vvborisov@ippe.ru

Aleksey A. Kamaev, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: kamaev@ippe.ru

Stepan A. Mikhin, Research Engineer

Email: samikhin@ippe.ru

Olga I. Myazdrikova, Junior Researcher

E-mail: okorzun@ippe.ru

Ilia A. Pakhomov, Head of Laboratory

E-mail: iapakhomov@ippe.ru

Sergey V. Perevoznikov, Senior Researcher

E-mail: perev@ippe.ru