

СТАТЬИ

УДК 621.039.58

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ НОРМАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО АВАРИЙНОМУ ОТБОРУ ПРОБ НА АЭС

Шарафутдинов Р.Б., к.т.н., Харитонов Н.Л., к.т.н

Проанализированы требования международных нормативных документов, относящиеся к системе аварийного отбора проб, позволяющей своевременно определить концентрации основных радионуклидов в пробах газа и жидкости, отобранных из систем или оборудования в аварийных состояниях АЭС. Рассмотрен пример реализованного проектного решения.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, система аварийного отбора проб.

INTERNATIONAL EXPERIENCE OF SAFETY REGULATION AND THE DESIGN SOLUTIONS FOR THE POST-ACCIDENT SAMPLING SYSTEM ON THE NPP

Sharafutdinov R.B., Ph.D., Kharitonova N.L., Ph.D.

The requirements of international regulation documents relating to the post-accident sampling system are considered. It's shown that the post-accident sampling systems shall be provided for determining, in a timely manner, the concentration of specified radionuclides in fluid process systems, and in gas and liquid samples taken from systems or from the environment, in accident conditions at the nuclear power plant. The example of completed design solutions is considered.

Key words: Nuclear Power Plant, Post Accident Sampling System.

Атомная станция, в соответствии с концепцией глубоководной защиты, должна иметь необходимые технические средства для управления аварией на различных стадиях. План действий по ядерной безопасности МАГАТЭ, с учетом опыта аварии, имевшей место на японской АЭС «Фукусима-Дайичи», утвержденный Генеральной конференцией МАГАТЭ в сентябре 2011 г. [1], включает в себя требование об усилении аварийной готовности на АЭС. Это требование предполагает совершенствование системы аварийного мониторинга с целью четкого понимания текущего состояния энергоблоков в зависимости от стадии развития аварии. Поэтому на АЭС должны быть средства представления информации, обеспечивающие при авариях (в том числе при тяжелых) адекватный объем контроля основных параметров, характеризующих состояние безопасности АЭС, а также параметров, используемых при выработке решений по управлению авариями. Пример конкретных решений, которые могут быть реализованы в свете плана действий МАГАТЭ в части совершенствования системы аварийного мониторинга, – обеспечен

ными приборами, рассчитанными на работу в условиях аварий, и системой аварийного отбора проб из систем и оборудования АЭС (далее по тексту – система PASS (Post Accident Sampling System)) [2].

Система PASS предназначена для отбора проб газа и жидкости из атмосферы под защитной оболочкой во время и после аварии. В случае аварии в атмосфере под защитной оболочкой могут присутствовать продукты радиолиза (водород и кислород), пар, взвешенные частицы и радиоактивные продукты деления (радиоактивные благородные газы (РБГ), радиоактивные аэрозоли и соединения йода). Присутствующие радионуклиды и их активность, а также состав газа в атмосфере под защитной оболочкой во время аварии могут служить индикатором изменения температуры ядерного топлива в активной зоне. Своевременное получение информации о степени повреждения активной зоны и условиях, преобладающих под защитной оболочкой во время аварии, очень важно для управления аварией.

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии Российской Федерации не содержат в настоящее время прямых требований о

включении в состав проекта АЭС системы аварийного отбора проб. В проектах российских АЭС наличие систем аварийного отбора проб не предусмотрено. Ниже приведены рекомендации МАГАТЭ к системе аварийного отбора проб.

Стандарт безопасности МАГАТЭ No SSR-2/1 [3], содержащий требования к обеспечению безопасности АЭС в проекте, вводит однозначное требование о необходимости наличия в проекте атомной электростанции системы PASS. В частности, Требование 71 [3] сформулировано следующим образом: «Системы отбора проб и системы аварийного отбора проб должны быть предусмотрены для своевременного определения концентрации основных радионуклидов в жидких средах технологических систем, а также в пробах газа и жидкости, отобранных из систем или оборудования во всех эксплуатационных и аварийных состояниях атомной электростанции». Ранее в аналогичном стандарте безопасности МАГАТЭ No NS-R-1 [4] требование о наличии системы аварийного отбора отсутствовало. Требования стандарта SSR-2/1 [3], в первую очередь, распространяются на вновь проектируемые АЭС нового поколения, в которых средства для управления тяжелой аварией включены в состав проекта АЭС. Они не всегда могут быть реализованы на АЭС, находящихся в эксплуатации или в стадии сооружения (пункт 1.3 [3]).

Технический отчет МАГАТЭ, рассматривающий контрольно-измерительные приборы и средства автоматики на АЭС [5], содержит положение о необходимости наличия системы дистанционного отбора проб для получения представительных проб теплоносителя реактора и проб парогазовой среды из атмосферы под защитной оболочкой при аварийных условиях. Отбор проб должен обеспечить оперативное определение активности радионуклидов, присутствующих в пробе [5].

Необходимо отметить, что в ходе проверок безопасности эксплуатации АЭС, выполняемых МАГАТЭ (OSART) и Всемирной Ассоциацией Организаций, эксплуатирующих атомные электростанции (WANO), определяется обеспечение эксплуатационной готовности системы PASS и, следовательно, подразумевается наличие на АЭС такой системы.

Руководство по безопасности МАГАТЭ по химии No SSG-13 [6], используемое при проведении миссий OSART, определяет эксплуатационные требования к системе PASS (пункт 6.43) следующим образом: «Система аварийного про-

боотбора или другое подходящее оборудование для отбора проб должна находиться в работоспособном состоянии, когда это требуется для ликвидации последствий аварии. Если система PASS отсутствует на АЭС, должны быть предусмотрены другие способы, позволяющие обеспечить оценку повреждения активной зоны и выхода продуктов деления под защитную оболочку при аварии».

Документ [7] содержит критерии оценки, разработанные и применяемые WANO при проведении Партнерских проверок безопасности эксплуатации АЭС. Согласно [7], система PASS должна обеспечить проведение представительных отборов проб теплоносителя, воздуха гермооболочки и жидкостей, позволяющих получить достаточно точные аналитические результаты по требуемым аварийным параметрам.

В нормативных документах стран Восточной Европы (Чехии, Венгрии, Словакии), АЭС которых объединены в форум АЭС с ВВЭР «ВВЭР-клуб» (АЭС «Темелин», «Дукованы», «Пакш», «Моховце», «Богунце»), требование об обеспечении системы PASS отсутствует со ссылкой на рекомендации Западноевропейской Ассоциации органов регулирования ядерной безопасности (WENRA) [8]. Для получения информации о текущем состоянии энергоблока в зависимости от стадии развития аварии предполагается использовать систему аварийного мониторинга PAMS (Post Accident Monitoring System), позволяющую контролировать температуру на выходе из активной зоны, температуру теплоносителя в каждой из петель охлаждения реактора, избыточное давление под защитной оболочкой, а также проводить измерение концентрации водорода в гермообъеме.

В отличие от стран Восточной Европы, в США, Германии и Швейцарии требование о наличии системы PASS на АЭС закреплено в нормативных документах [9-12].

В США нормативные требования к системе PASS были разработаны Комиссией по ядерному регулированию (US NRC) после аварии в марте 1979 г. на энергоблоке № 2 американской АЭС «Three Mile Island» (TMI-2) и сформулированы в нормативных документах NUREG-0737 [11] и Regulatory Guide 1.97 [9], [10].

Выпущенные в 1984 г. нормативные документы NUREG-0737 [11] и Regulatory Guide 1.97 [9] содержали требование о необходимости выполнения на АЭС радиохимических и химических анализов в течение 3-часового периода после момента аварии с целью мониторинга и количественной

оценки следующих параметров:

- активности реперных радионуклидов в теплоносителе реактора и в атмосфере под защитной оболочкой реактора;
- концентрации водорода в атмосфере под защитной оболочкой;
- концентрации растворенных газов (водорода, кислорода), а также концентрации хлоридов и бора в жидких средах;
- значений рН в теплоносителе первого контура;
- концентрации борной кислоты, хлоридов и радионуклидов в воде прямка (аварийного бассейна) контаймента.

Позже US NRC из версии 3 Regulatory Guide 1.97 [9] были исключены требования:

- измерения рН водных сред в прямке (аварийном бассейне) путем отбора проб;
- отбора газовых проб с целью определения концентрации водорода под защитной оболочкой;
- отбора проб с целью определения активности соединений йода;
- анализа концентрации кислорода в теплоносителе реактора.

Исключение перечисленных требований обосновывалось недостатками проекта существующих систем пробоотбора PASS, а также тем, что для управления авариями и аварийного реагирования без увеличения риска последствий аварии могут использоваться другие источники информации. Несмотря на исключение перечисленных выше требований, в [10] отмечено, что для управления аварией было бы значительным преимуществом иметь возможность своевременного измерения величины рН воды в прямке (аварийном бассейне) и концентрации продуктов деления в атмосфере под защитной оболочкой. Информация о концентрации (активности) криптона и цезия в парогазовой атмосфере под защитной оболочкой может служить прямым индикатором выхода продуктов деления и степени повреждения активной зоны, которые трудно определить на основании измерения мощности поглощенной дозы, измерений температуры или измерения концентрации водорода. Информация о значениях рН в аварийном бассейне (прямке) требуется для принятия решений, связанных с необходимостью дополнительного реагирования на чрезвычайные ситуации, ликвидации последствий аварии, вентиляции гермообъема или оценки возможности доступа персонала под контаймент. Поддержание щелочного рН(25) (в диапазоне от 7 до 8) в прямке позволяет

значительно сократить выбросы радиоактивного йода в атмосферу, так как буферные свойства раствора должны препятствовать повторному выходу из раствора газообразного йода.

Указание о наличии системы PASS на АЭС Швейцарии содержится в документе [12], определяющем требования к техническому оснащению АЭС для обеспечения готовности к аварийным ситуациям. Данное указание относится, в первую очередь, к проектам вновь сооружаемых АЭС, а также к находящимся в эксплуатации энергоблокам, модификация которых выполняется в соответствии с пунктом 2 статьи 22 Закона о ядерной энергии Швейцарии от 10 Декабря 2004 г. (KEG, SR 732.1). Система PASS, предназначенная для определения обстановки в атмосфере под защитной оболочкой во время и после аварии, должна состоять из двух подсистем [12]:

- подсистемы, предназначенной для отбора проб жидкости с целью определения концентрации борной кислоты, активности радионуклидов ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{90}Sr и, возможно, альфа-активности;
- подсистемы, предназначенной для отбора газовых проб из атмосферы под защитной оболочкой, с целью определения концентрации (активности) РБГ и состава атмосферы (концентраций водорода, окиси углерода, кислорода и т.д.).

Для системы аварийного отбора проб устанавливаются следующие требования [12]:

- в подсистеме PASS, предназначенной для отбора жидкостных проб, должно быть исключено образование отложений в пробоотборных линиях;
- измеренные активности для каждого радионуклида должны отличаться от реальных значений не более, чем в три раза.

Рекомендация об оснащении всех АЭС Германии системой PASS была сформулирована Комиссией по безопасности ядерных реакторов (RSK) при Федеральном министерстве экологии, охраны природы и безопасности ядерных реакторов Германии (BMU) по результатам оценки безопасности эксплуатации АЭС Германии после аварии на Чернобыльской АЭС [2,13]. В докладе RSK указывалось, что все атомные станции Германии должны быть оборудованы системой, обеспечивающей отбор проб из атмосферы под защитной оболочкой для проектной аварии. Там же было сформулировано требование о необходимости разработки требований к системе отбора проб, позволяющей определить активности радионуклидов в атмосфере

под защитной оболочкой и сделать выводы о состоянии активной зоны реактора при тяжелых авариях. В настоящее время требование об оснащении всех АЭС Германии системой аварийного отбора проб является обязательным [2].

Компанией AREVA NP GmbH была разработана система PASS, рассчитанная на протекание тяжелых аварий. Система смонтирована в настоящее время на 15 АЭС Германии. Запланировано оснащение этой системой четырех энергоблоков реакторов типа EPR™*, сооружаемых в настоящее время в Китае, Финляндии и во Франции [2]. Система предназначена для отбора проб газа и жидкости из атмосферы под защитной оболочкой после аварии. Она обеспечивает отбор представительных проб атмосферы защитной оболочки (радиоактивные аэрозоли, йоды, инертные газы РБГ). Анализ проб позволяет получить дополнительную информацию о ситуации под защитной оболочкой и степени повреждения активной зоны.

Система PASS, разработанная компанией AREVA [14], основана на технологии прямого (in-situ) отбора проб. За счет конструкции пробоотборного зонда с подключенной функцией промывки исключено снижение точности измерения из-за образования отложений в трубах. Технология разбавления обеспечивает простоту обращения с пробами.

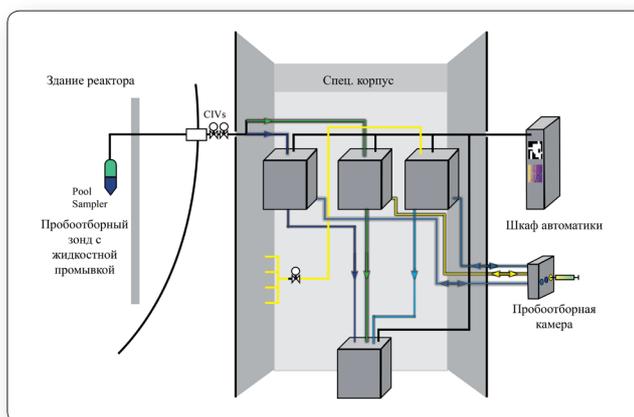
Система PASS, предложенная компанией AREVA [14], имеет модульную конструкцию, включающую в себя следующие модули (см. рисунок):

- модуль пробоотбора парагазовой атмосферы защитной оболочки реактора (пробоотборный зонд с промывкой) (Pool Sampler) с подсоединенными линиями промывки и отводными линиями транспортировки проб;
- модуль подготовки и разбавления проб с подсоединенными линиями пробоотбора (пробоот-

борный бокс);

- модуль отвода (сброса) радиоактивных проб и одновременно модуль дезактивации.

Использование пробоотборного зонда с жидкостной промывкой позволяет выполнить разделение аэрозолей/йода и инертных радиоактивных газов РБГ. В качестве промывочного раствора используется слабощелочной раствор, например раствор NaOH, обеспечивающий поддержание pH(25) в диапазоне от 7 до 8. Когда проба отбирается из атмосферы под защитной оболочкой, аэрозоли и соединения йода переходят в жидкую фазу, т.е. в промывающую жидкость пробоотборного зонда, и удерживаются в ней. РБГ остаются в газовой фазе. Эффективность удержания аэрозолей/йодов в промывающей жидкости пробоотборного зонда с жидкостным заполнением (Pool Sampler) составляет около 99%. Разбавление проб выполняется в модулях. Очищенная (промытая) газовая проба, содержащая в основном РБГ, подается в модуль для разбавления газовых проб и разбавляется азотом. После отбора газовой пробы проба жидкости (содержащая перешедшие в водный раствор удаленные из газовой среды аэрозоли и соединения радиоактивного йода) транспортируется путем подачи импульсов давления по пробоотборным линиям к модулю для разбавления жидкостных проб. Для разбавления используется обессоленная вода. После разбавления пробы газа и жидкости подаются в пробоотборную камеру, в которой с помощью шприца выполняется отбор проб газа и жидкости. Все модули разбавления, пробоотборная камера и шкафы с приборами автоматики размещены в спецкорпусе. Для обеспечения радиационной защиты персонала при отборе проб в пробоотборной камере все модули и пробоотборные линии, по которым транспортируются высокоактивные жидкости и газы, располагаются за биологической защитой.



* Реактор типа EPR™ (Европейский Реактор с водой под давлением) – совместный проект компании Areva NP GmbH, Electricité de France (EDF) во Франции и Siemens AG в Германии.

Список литературы

1. IAEA Action Plan on Nuclear Safety, GOV/2011/59-GC(55)/14, September 2011.
2. Antworten eines Herstellers auf die Ereignisse in Fukushima. U.Srall, U.Waas, VGB Power Tech, 1/2, 2012.
3. Safety of Nuclear Power Plants: Design. International Atomic Energy Agency. Safety Standards No. SSR-2/1, Specific Safety Requirements, Vienna, 2012.
4. Safety of Nuclear Power Plants: Design. International Atomic Energy Agency. Safety Standards No. NS-R-1, Specific Safety Requirements, Vienna, 2000.
5. Modern Instrumentation and Control for Nuclear Power Plants. A Guidebook. Technical reports series No. 387. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999.
6. Chemistry Programme for Water Cooled Nuclear Power Plants. International Atomic Energy Agency. Specific Safety Guide Series, No. SSG-13, Vienna, 2011.
7. WANO Performance Objectives and Criteria, January 2005 (Revision 3).
8. Western European Nuclear Regulator's Association, On the Requirements Concerning Nuclear Facility Designs. BN – JB – 1.0. Requirements for the Implementation of OEP and SAMB Type Operating Regulations, BN – JB – 1.11.
9. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Instrumentation for Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants to Assess Plant and Environs Conditions During and Following an Accident. Regulatory Guide 1.97, Rev. 3, US Gov Printing Office, Washington, DC (1983).
10. U.S. Nuclear Regulatory Commission office of Nuclear Regulatory Research. Regulatory Guide 1.97 «Criteria for Accident Monitoring Instrumentation for Nuclear Power Plants», Revision 4, June 2006.
11. U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-0737, «Clarification of TMI Action Plan Requirements». Final Report, 1980.
12. Notfallschutz in Kernanlagen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. ENSI-B12, Ausgabe April 2009.
13. Eckardt B., Betz R. In-Situ PASS for Post-Accident Management, 25th DOE/NRC Nuclear Air Cleaning and Treatment Conference, August 3 – 6, 1998 Minneapolis, Minnesota.
14. Bernd A. Eckardt, Richard Betz, Gerhard Röbig, Containment In-Situ PASS and Emission Monitoring System Design and Implementation, Information by Framatome ANP, Offenbach, Germany, paper presented at a OECD workshop on the implementation of SAM measures, PSI Switzerland, September 2001.

