

пространения сейсмических волн само по себе приводит к смещению спектральных пиков исходного сейсмического воздействия в низкочастотную область, то бетонная подушка в окружении грунтов обратной засыпки обладает выраженными сейсмоизолирующими свойствами на частоте, соответствующей первой резонансной частоте слоя на заделке.

Третий вывод заключается в том, что в отличие от сейсмоизолированного движение сооружения на бетонной подушке определяется откликом не только на частоте, соответствующей первой резонансной частоте слоя на заделке, но и на других резонансных частотах слоя на заделке. При этом снижение или усиление колебаний на этих частотах зависит от соотношения длины волны в слое обратной засыпки, соответствующей резонансным частотам слоя на заделке, и толщины бетонной подушки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тяпин А.Г.** Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. М.: АСВ, 2013. 392 с.
2. **Тяпин А.Г.** Влияние глубины подушки из укрепленного грунта под фундаментной плитой на сейсмическую реакцию сооружения. Часть I. Демонстрация эффекта. — Строительная механика и расчет сооружений, 2016, № 5, с. 37—44.
3. **Тяпин А.Г.** Влияние глубины подушки из укрепленного грунта под фундаментной плитой на сейсмическую реакцию сооружения. Часть II. Роль кинематического взаимодействия сооружения с основанием. — Там же, с. 48—55.
4. **СП 63.13330.2018.** СНиП 52-01—2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
5. **ASCE/SEI 4-16.** Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. American Society of Civil Engineers, 2017.
6. **ACS SASSI.** An Advanced Computational Software for 3D Dynamic Analysis Including Soil-Structure Interaction. User Manual, 2019.
7. **EERC 72-12.** SHAKE. A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. College of Engineering. University of California, Berkeley, 1972.

Поступила в Редакцию 12.09.22

УДК 621.039.58

УПРАВЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ АВАРИЯМИ НА РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ ПРОЕКТА АЭС-2006 (ЛЕНИНГРАДСКАЯ АЭС-2)

Сидоров В.Г., Астафьева В.О., Крылов Ю.В., Титов К.С., Кухтевич В.О., Семашко С.Е., Митрюхин А.Г.
(АО «Атомэнергoproject», г. Санкт-Петербург)
e-mail: vgsidorov@atomproekt.com

В настоящей статье показано управление тяжелыми авариями на реакторных установках проектов АЭС-2006, для которых базовой является Ленинградская АЭС-2.

Тяжелая авария, при которой происходит плавление или частичное разрушение ядерного топлива на АЭС, возможна только в случае отказа предусмотренных проектом систем безопасности, обеспечивающих теплоотвод от реакторной установки. Для проектов типа АЭС-2006, прототипом которых является Ленинградская АЭС-2, пассивная система отвода теплоты защитной оболочки (СПОТ ЗО) и пассивная система отвода теплоты реактора через парогенераторы (СПОТ ПГ) позволяют осуществить теплоотвод даже в условиях полной по-

тери электропитания. В этих условиях основными событиями, при которых существует опасность возникновения тяжелой аварии с плавлением активной зоны реактора, являются течи из первого контура в защитную оболочку, при которых не функционируют системы безопасности, компенсирующие потерю теплоносителя.

В соответствии с требованиями к безопасности АЭС [1, 2] для аварий с тяжелым повреждением топлива требуется предусмотреть меры для минимизации радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду. Действия по управлению тяжелыми авариями в соответствии с концепцией глубокоэшелонированной защиты начинаются на 4-м уровне после диагностирования перехода аварии в тяжелую

стадию. При этом значительная часть управляющих мер осуществляется оператором в ручном режиме.

До перехода аварии в тяжелую стадию управляющие действия персонала АЭС ориентированы главным образом на предотвращение тяжелого повреждения топлива в активной зоне и бассейне выдержки отработавшего топлива. Основной задачей на данном этапе управления аварией является подпитка бассейна выдержки отработавшего топлива и первого контура. Для подпитки реактора требуется восстановить работоспособность оборудования систем, подающих воду в первый контур. Охлаждение бассейна выдержки, альтернативное по отношению к проектным системам, может быть организовано посредством использования внешних запасов воды, расположенных на площадке. В проектах АЭС-2006 для этого предусмотрена отдельная независимая система с автономным электропитанием.

После перехода аварии в тяжелую стадию начинаются действия по смягчению ее последствий. Для аварий с течами первого контура основными задачами являются локализация радиоактивных веществ внутри защитной оболочки и уменьшение радиоактивного выброса в атмосферу. Управление тяжелой аварией предполагает:

защиту оболочки от физических воздействий, которые могут приводить к нагрузкам, нарушающим ее целостность и герметичность;

перевод АЭС в контролируемое состояние в целях предотвращения повреждения защитной оболочки и реализации превентивных мер по снижению радиационного воздействия;

перевод АЭС после достижения контролируемого состояния в безопасное состояние для минимизации радиационных последствий.

Контролируемое состояние после тяжелой аварии характеризуется стабилизацией или устойчивым снижением всех параметров среды в защитной оболочке при отсутствии опасности, связанной с нарушением сохраненных барьеров безопасности. Переход АЭС в безопасное состояние после тяжелой аварии диагностируется, если обеспечиваются следующие условия:

расплав надежно локализован и затвердевает, его температура стабильна или снижается;

теплота от обломков активной зоны отводится и передается конечному поглотителю;

конфигурация ядерных делящихся материалов такова, что эффективный коэффициент размножения нейтронов ниже 1;

давление в защитной оболочке настолько низкое, что почти отсутствует выделение продуктов деления в атмосферу.

Переход в безопасное состояние может быть осуществлен, как только функционирование необходимых для этого систем будет восстановлено. Достижение безопасного состояния после тяжелой аварии для проектов АЭС-2006 возможно путем восстановления охлаждения среды защитной оболочки и подавления существующих источников парообразования (устройство локализации расплава, бассейн выдержки отработавшего топлива). Управление тяжелыми авариями подразумевает защиту барьеров безопасности от физических явлений, характерных для тяжелых аварий. Основным барьером безопасности при тяжелых авариях является защитная оболочка. Ее защита после перехода аварии в тяжелую стадию становится приоритетной задачей.

Физические явления, представляющие опасность защитной оболочке, и меры по их предотвращению или смягчению, реализованные в рамках проектов АЭС-2006, приведены в таблице.

Для обоснования мер по управлению тяжелыми авариями был выполнен детерминистический анализ.

Детерминистический анализ тяжелых аварий. Детерминистический анализ тяжелых аварий выполняется с использованием аттестованных расчетных кодов:

программного комплекса СОКРАТ-ВЗ/КУПОЛ-М для сопряженного моделирования тяжелоаварийных процессов в защитной оболочке, а также внутриконтурных процессов;

программного модуля HEFEST-EVA (входит в состав кода СОКРАТ/ВЗ) для расчета физико-химических процессов в устройстве локализации расплава);

кодов LIMITS-V и FIRECON для анализа условий горения в защитной оболочке;

кода TDMCC для анализа критичности.

Результаты детерминистического анализа используются для оценки выполнения специаль-

Явления, представляющие опасность для защитной оболочки, и пути их предотвращения для проекта АЭС-2006

Физическое явление	Опасность нарушения барьера безопасности	Предотвращение нарушения барьера безопасности
Детонация/горение горючих газов в защитной оболочке	Воздействие температуры и давления со стороны среды	Меры по предотвращению детонации, работа пассивной системы удаления водорода
Внутрикорпусные паровые взрывы	Воздействие на защитную оболочку после разрыва корпуса реактора из-за роста давления в первом контуре	Внутренние свойства оборудования, меры по исключению подачи воды в перегретую зону
Наличие высокого давления в первом контуре при разрушении корпуса реактора	Прямой нагрев защитной оболочки за счет теплообмена с диспергированным расплавом после разрушения корпуса реактора	Внутренние свойства оборудования, наличие пассивных систем теплоотвода от первого контура, снижение давления в первом контуре
Неконтролируемая ядерная реакция	Воздействие на защитную оболочку после разрыва корпуса реактора из-за роста давления в первом контуре	Внутренние свойства оборудования, меры по исключению подачи воды в активную зону.
Нарушение теплоотвода от защитной оболочки к конечному поглотителю	Медленное статическое нагружение внутренним давлением	Использование специальной системы теплоотвода от защитной оболочки
Выход расплава за пределы корпуса реактора и бассейна выдержки отработавшего топлива	Плавление конструкций при контакте с расплавом топлива	Удержание расплава вне корпуса реактора с использованием устройства его локализации, альтернативное охлаждение топлива в бассейне выдержки отработавшего топлива

ных тяжелоаварийных критериев. Выполнение приемочных критериев является обязательным условием не превышать нормативные предельные выбросы из защитной оболочки, установленные для тяжелых аварий. Данные критерии были разработаны для проекта АЭС-2006 на основе требований отечественных нормативных документов, рекомендаций МАГАТЭ и опыта расчетного обоснования АЭС.

Для тяжелых аварий используются следующие приемочные критерии:

концентрация смеси газов в защитной оболочке не должна достигать взрывоопасной (детонационной);

взаимодействие расплава с водой не должно приводить к повреждению строительных конструкций защитной оболочки за счет пикового роста давления;

разрушение корпуса при термическом воздействии расплава при высоком давлении должно быть исключено. В качестве предельно допустимого давления на время разрушения корпуса

реактора выбрано 2 МПа в соответствии с рекомендациями [3];

повреждение защитной оболочки при прямом воздействии расплава топлива должно быть исключено;

параметры среды в защитной оболочке должны обеспечивать ее целостность и нормальное функционирование систем по управлению авариями. Максимальные допустимые параметры выбираются на основе анализа прочности строительных конструкций защитной оболочки под воздействием различных внутренних нагрузок;

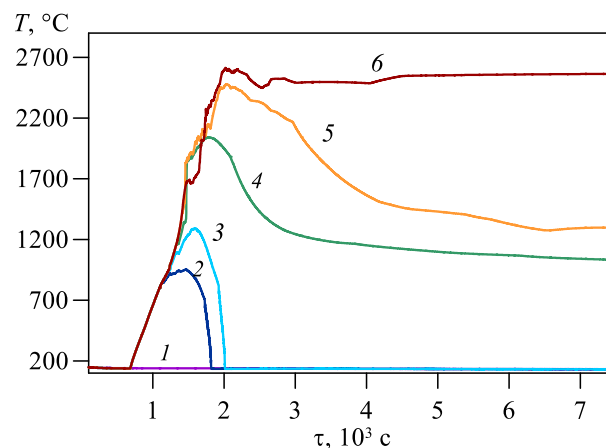
подкритичность разрушенной и расплавленной активной зоны и устройства локализации расплава должна быть обеспечена. В проектах АЭС-2006 принято, что подкритичность обеспечивается при эффективном коэффициенте размножения нейтронов не более 0,95 [4].

Рассмотрим отдельные аспекты организации мер по управлению авариями, актуальные для реакторных установок проекта АЭС-2006.

Подача воды в первый контур для предотвращения разрушения активной зоны реактора. На начальном этапе аварии до ее перехода в тяжелую стадию оператор должен использовать все возможные пути и средства, чтобы предотвратить ее переход в тяжелую фазу. При возможности восстановления подпитки первого контура необходимо подавать воду в реактор до диагностирования значительного повреждения активной зоны. Возможность такой подачи определяется восстановлением работоспособности систем, подающих воду в первый контур. После начала разогрева активной зоны подача воды в первый контур может привести как к положительным, так и отрицательным последствиям. Для принятия решения о подаче воды в перегретую активную зону необходимо оценить опасности, которые могут привести к возможному повреждению защитной оболочки.

Эффективность мер по предотвращению значительных разрушений активной зоны реактора при восстановлении подпитки первого контура зависит от интервала времени от начала разогрева активной зоны до подачи воды и от расхода подаваемой воды. Опасностями для герметичности защитной оболочки являются увеличение образования водорода, возможность потери подкритичности системы топливо—вода при частичном или полном разрушении активной зоны (это может привести к неконтролируемой ядерной реакции) и невозможность внутрикорпусного удержания расплава в случае образования его обширной области из-за отсутствия специальных технических средств, позволяющих организовать внешнее охлаждение корпуса реактора. Если опасности, связанные с риском повреждения защитной оболочки, велики, то следует отказаться от попыток локализации поврежденной активной зоны внутри корпуса реактора и ориентироваться на внекорпусную локализацию в устройстве локализации расплава.

Опасности были проанализированы с использованием тяжелоаварийных кодов СОКРАТ/ВЗ-КУПОЛ-М и LIMITS-V. Пример анализа для аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода и отказом активных систем охлаждения активной зоны высокого и низкого давления (САОЗ ВД и САОЗ НД) показан на рис. 1. В сценарии аварии предполагалось, что опера-



Р и с. 1. Максимальная температура оболочек ТВЭЛов в активной зоне при подаче воды при температуре над активной зоной 400 (1), 500 (2), 600 (3), 650 (4), 700 (5), 800 °C (6)

тору удастся восстановить работоспособность одного канала САОЗ ВД к началу разогрева активной зоны и подать воду в первый контур. Для данного сценария аварии рассматривалась подача воды при достижении температуры над активной зоной 400, 500, 600, 650, 700, 800 °C.

Расчеты показали, что залив активной зоны, при котором не возникает опасность нарушения целостности защитной оболочки, возможен до разогрева активной зоны до 650—750 °C. Предельная температура, после достижения которой разрушение активной зоны не может быть остановлено без ее существенного повреждения, зависит от начала подачи воды и расхода подпитки первого контура от восстановленной системы безопасности.

После осушения активной зоны оболочки ТВЭЛов разогреваются быстро, оператор имеет небольшой запас времени (для больших течей ~10 мин) для принятия решения о подаче воды в первый контур после начала разогрева. Соответственно риск, связанный с ошибкой оператора при подаче борированной воды в разрушенную активную зону, велик. В соответствии с анализом в качестве сигнала для определения запрета подачи воды в первый контур рекомендовано диагностирование роста температуры над активной зоной более 650 °C. После достижения температурой этого значения оператору запрещено подавать воду в активную зону. При этом необходимо принять меры, исключающие возможность возобновления подачи воды. Для предотвращения возможности несанкционированного

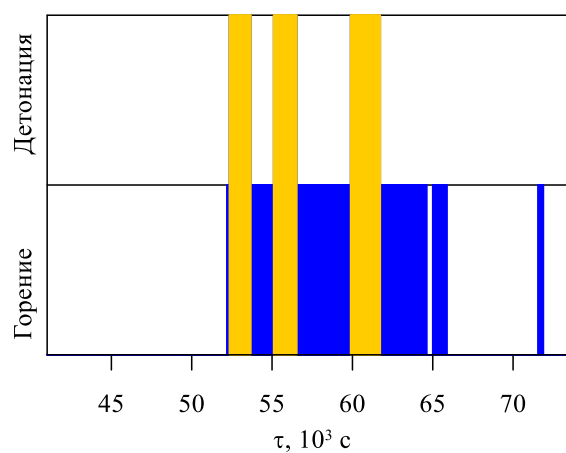
запуска систем, подающих воду, предполагается демонтировать соответствующие управляющие блоки насосов.

Диагностика перехода аварии в тяжелую стадию. В соответствии с общепринятой международной практикой переход аварии в тяжелую стадию диагностируется по показаниям датчиков температуры над активной зоной при превышении определенного значения. Предельная температура, после достижения которой осуществляется переход к управлению тяжелой аварией, определяется характеристиками оборудования и составом мер, применяемых персоналом АЭС для управления тяжелыми авариями. Для проектов реакторных установок АЭС-2006 (Ленинградская АЭС-2, Белорусская АЭС, АЭС «Пакш-2» (Венгрия), АЭС «Эль-Дабаа» (Египет), АЭС «Сюйдапу», блоки 7, 8 Тяньваньской АЭС, Китай) она находится в интервале 400—650 °С.

Водородная безопасность при тяжелых авариях. Наиболее сложной проблемой, требующей ввода специальных управляющих мер для проектов АЭС-2006 при тяжелых авариях, является детонация в помещениях защитной оболочки. Для снижения концентрации водорода используются каталитические рекомбинаторы. В соответствии с паспортными данными они медленно выходят на базовый режим работы и имеют ограниченную производительность. Мощность рекомбинаторов выбирается таким образом, чтобы обеспечить окисление всей массы водорода, выброшенного в защитную оболочку, за определенный промежуток времени. Однако в условиях тяжелых аварий после интенсификации парациркониевой реакции при достижении температуры циркониевых оболочек твэлов температуры более 1200 °С расчеты показывают быстрый пиковый выброс водорода, за счет которого достигается его высокая концентрация в помещениях.

Анализ показал, что в отсутствие специальных мер по управлению, которые влияют на концентрацию водорода в помещениях, примыкающих к месту течи из первого контура, при тяжелых авариях с малыми течами теплоносителя может образовываться взрывоопасная концентрация горючих газов. Для проектов АЭС-2006 эта проблема усугубляется наличием

защитной оболочки большого объема и работой пассивных систем теплоотвода, снижающих в нем концентрацию пара. Для примера на рис. 2 показана картограмма, иллюстрирующая возможность детонации водорода в аварии с малой течью теплоносителя первого контура условным диаметром 40 мм из холодной нитки первого контура реакторной установки АЭС «Эль-Дабаа» с одновременным отказом активных систем охлаждения активной зоны. На картограмме отмечены расчетные объемы кода КУПОЛ-М, в которых с помощью кода LIMITS-V оценена возможность детонации после начала тяжелой аварии. Расчеты показали опасность детонации в боксах парогенераторов и прилегающих к ним помещениях.



Р и с. 2. Условия горения и детонации для аварии с течью Ду 40 с отказом активных систем безопасности

Для решения данной проблемы следует изменить соотношение концентрации водорода и кислорода в помещениях защитной оболочки. Одним из способов является повышение количества пара в защитной оболочке путем уменьшения его конденсации или организация дополнительного поступления для инертизации. Для этой цели требуется отключать спринклерную систему в тех сценариях, где она работоспособна. При этом, как показали расчетные оценки с привлечением кода СОКРАТ-ВЗ/КУПОЛ-М, не нарушаются проектные критерии по дозовым нагрузкам, установленные для запроектных аварий. Соответствующие действия по отключению спринклерной системы предусмотрены при диагностировании опасности тяжелой аварии после отказа подпитки первого контура. Однако для

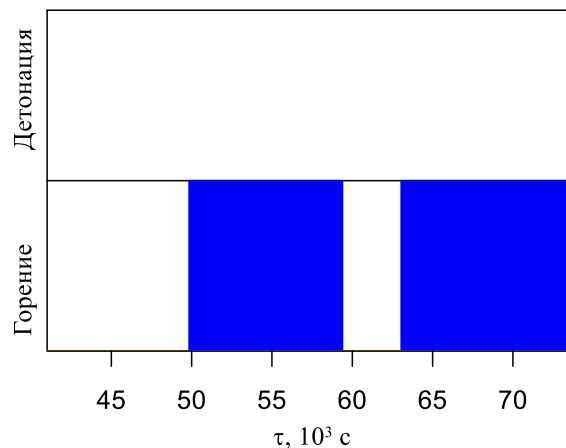
сценариев аварий с малой течью теплоносителя, как показывают расчеты, одного этого действия недостаточно. Дополнительное поступление пара может быть организовано путем ограничения теплоотвода к второму контуру посредством отключения системы пассивного теплоотвода через парогенераторы (СПОТ ПГ) и быстродействующих редуцирующих устройств для сброса в атмосферу (БРУ-А). Расчеты показали эффективность данной меры для предотвращения образования детонационно опасных смесей.

Вместе с тем такие управляющие меры приводят к ускорению развития аварии и ее переходу в тяжелую стадию. Более оптимальным вариантом управления является принудительный сброс водорода, образующегося в первом контуре, в помещение большого объема, удаленное от помещения с течью. Данная мера осуществляется после диагностирования перехода аварии в тяжелую стадию и позволяет снизить концентрацию водорода в помещениях, приближенных к месту локализации течи. Для проектов АЭС-2006 есть два варианта сброса: в центральный зал здания реактора, расположенный над боксами парогенераторов, или в помещение трубопроводов и арматуры, находящееся под помещениями парогенераторов. Для проектов АЭС «Пакш-2», АЭС «Эль-Дабаа» был выбран вариант со сбросом парогазовой среды из первого контура в подкупольное пространство. В этом случае сброс осуществляется из коллектора компенсатора давления с помощью специальной системы. Организация дополнительного сброса среды первого контура исключает высокое давление в корпусе реактора на время его разрушения в сценариях тяжелых аварий с отказом теплоотвода через второй контур.

Моделирование поведения горючих газов в защитной оболочке с привлечением тяжелоаварийных кодов показало эффективность принятого технического решения для обеспечения водородной безопасности для средних и малых течей первого контура: зона существования условий для детонации полностью исчезла, зона горения уменьшилась.

Для проектов 7-го, 8-го блоков Тяньваньской АЭС, АЭС «Сюйдапу», для которых Ленинградская АЭС-2 также является базовой, сброс среды первого контура осуществляется

в помещение арматуры, расположенное ниже боксов парогенераторов. Расчеты показали эффективность принятого технического решения (рис. 3). Аналогичное техническое решение планируется реализовать и на Ленинградской АЭС-2.



Р и с. 3. Условия горения и детонации для аварии с течью Ду 40 с отказом активных систем безопасности при наличии управляющих действий по предотвращению детонации горючих газов

Рекомендации для действий оператора по управлению тяжелыми авариями. Последовательность и приоритетность задач по управлению тяжелыми авариями, выполняемых оперативным персоналом, изложены в виде инструкций в Руководстве по управлению тяжелыми авариями. В нем также содержится набор критериев, которые определяют опасность для герметичности защитной оболочки и требуют немедленного реагирования и смены приоритета управления в инструкциях.

Детерминистический анализ позволяет дать следующие рекомендации по разработке инструкций по управлению тяжелой аварией (ИТА) и инструкций по управлению серьезными угрозами (ИСУ) для проектов АЭС-2006 в части состава и приоритета управляющих действий:

для ИТА «Предотвратить переход аварии в тяжелую стадию», имеющей наивысший приоритет, следует указать в качестве точки выхода из нее максимальную температуру, до которой осуществляются действия оператора по ее реализации, а также меры, направленные на исключение несанкционированной подачи воды после этой точки. Для проектов АЭС-2006 в настоящее время она соответствует температуре над актив-

ной зоной, при которой диагностируется переход аварии в тяжелую стадию;

после перехода аварии в тяжелую стадию наибольшим приоритетом является исключение возможности детонации горючих газов в защитной оболочке. Соответствующие действия оператора по предотвращению образования детонационно опасных смесей газов должны быть отражены в ИТА как имеющие высокий приоритет;

после перехода аварии в тяжелую стадию оператор должен убедиться, что давление в первом контуре не представляет опасность для защитной оболочки, и реализовать ИТА «Снизить давление в первом контуре». Начало действия данной инструкции соответствует диагностированию перехода аварии в тяжелую стадию;

в дальнейшем требуется осуществить действия, направленные на долгосрочную локализацию расплава, — согласно ИТА «Обеспечить безопасное удержание расплава в устройстве локализации расплава». Для этого оператор должен обеспечить надежное дополнительное охлаждение его стенки за счет открытия клапанов на линиях, соединяющих шахту и бак-приямки. Это действие диверсифицирует охлаждение стенки посредством воды, поступающей в шахту с пола помещений парогенераторов. Далее оператор должен отследить срабатывание клапанов пассивной подачи воды и при необходимости подать воду из шахты ревизии внутрикорпусных устройств на поверхность расплава;

после начала тяжелой аварии при проектном функционировании системы пассивного теплоотвода от защитной оболочки нет опасности ее переопрессовки и не требуется обязательная работа спринклерной системы. Основной задачей оператора на данном этапе является обеспечение необходимого уровня воды в баках запаса для пассивных систем безопасности из внешних источников после их осушения;

минимизация выбросов радиоактивных веществ в атмосферу согласно ИТА «Уменьшить

выброс продуктов деления» выполняется за счет подачи щелочи оператором в приямок с помощью специальной системы при диагностировании начала тяжелой аварии для связывания радиоактивных изотопов иода;

на более позднем этапе развития аварии для снижения выброса из защитной оболочки требуется уменьшить в ней давление до атмосферного уровня. Как показывает расчетный анализ, эффективность данного действия обеспечивается только при восстановлении работы спринклерной системы, подавлении парообразования в бассейне выдержки отработавшего топлива и устройстве локализации расплава. Пуск спринклерной системы при тяжелой аварии можно выполнять только после достижения низкой концентрации водорода в защитной оболочке (ниже предела воспламенения 4%). В процессе работы спринклерной системы необходимо отслеживать концентрацию водорода и не допускать ее превышения 4%.

Заключение. Меры по управлению, разработанные для проектов АЭС-2006, позволили обеспечить выполнение проектных критериев по безопасности, установленных для тяжелых аварий. Их реализация в проектах АЭС-2006 требует внесения соответствующих коррективов в Руководство по управлению тяжелыми авариями в части состава и приоритетности инструкций по управлению тяжелыми авариями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Безопасность** атомных электростанций: проектирование. Сер. норм безопасности SSR-2/1 (Rev. 1). Вена: МАГАТЭ, 2016.
2. **Общие** положения обеспечения безопасности атомных станций НП-001—15. М., Ростехнадзор, 2015. 57 с.
3. **Containment** System. Chapter 9, European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. Generic and Nuclear Island Requirements, Revision E. France, 2016.
4. **Правила** безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии НП-061—05. М., Ростехнадзор, 2005. 24 с.

Поступила в Редакцию 12.09.22