

УДК 621.039.003

Билык Б.И.¹, Рыжков С.С.²

¹Обособленное подразделение “Южно-Украинская АЭС” НАЭК “Энергоатом”

² Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ 1 БЛОКА ЮЖНО-УКРАИНСКОЙ АЭС НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ГЛУБОКО ЭШЕЛОНИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ

Наведено концепцію глибоко ешелонаного захисту, яка базується на рівнях захисту, що містить послідовність бар'єрів на шляху виходу радіоактивних речовин у навколишнє середовище. Показано заходи, які забезпечують екологічну безпеку ПУ АЕС.

Приведена концепция глибоко ешелонированной защиты, опирающаяся на уровни защиты и включающая последовательность барьеров на пути выхода радиоактивных веществ в окружающую среду. Показаны мероприятия, обеспечивающие экологическую безопасность ЮУ АЭС.

We propose a conception of highly dis-
pose protection based of safety levels and
including a sequence of barriers on the
way of exit of radioactive substances to the
environment. We also discuss measures
for ensuring the ecological safety of the
Yuzhnoukrainskaya nuclear power plant.

АБП – автомат бесперебойного питания;

АЗ –аварийная защита;

АКНП – аппаратура контроля нейтронного потока;

АПЭН – система аварийной питательной воды;

АС – атомная станция;

АЭС –атомная электростанция

БЗОК – быстродействующий отсечной клапан;

БРУ-А – быстродействующая редуцирующая установка сброса пара в атмосферу;

БРУ-К – быстродействующая редуцирующая установка сброса пара в конденсатор;

ВВЭР – водо-водяной реактор;

ВД – высокое давление;

ВПЭН – система вспомогательной питательной воды;

ГЕ – гидроёмкости пассивной части СОАЗ;

ГЗЗ – главная запорная задвижка;

ГО – гермообъём;

ГЦН – главный циркуляционный насос;

ДГ – дизель-генератор;

ИПУ – импульсно-предохранительное устройство;

КД – компенсатор давления;

КО – компенсатор объема;

МАГАТЭ – Международное агентство ядерной энергии;

НД – низкое давление;

ОП – обслуживающий персонал;

ОР – органы регулирования;

ПВ – питательная вода;

ПГ – парогенератор;

ПД –продукты деления;

ПК – паровой контур;

РУ – реакторная установка;

СБ – системы безопасности;

СЛА – система локализации аварий;

СОАЗ – система аварийного охлаждения зоны;

СУЗ – система управления и защиты;

ТВ – тепловыделения;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

ТН – теплоноситель;

ТК – тепловой контроль;

ТМ – топливный материал;

ЭС –электроснабжение;

ЮУ АЭС – Южно-Украинская АЭС;

1-к – первый контур;

2-к – второй контур.

Введение

Вопросы обеспечения экологической безопасности для атомной энергетики являются неотъ-

емлемой частью ее функционирования и охватывают все сферы деятельности атомных станций. Среди наиболее актуальных является вопрос обеспечения безопасной работы реактора и об-

служивающих его систем в соответствии с современными требованиями МАГАТЭ. Первый энергоблок ЮУ АЭС с реактором ВВЭР-1000 относится к проекту “малой серии”, который был разработан в Российской Федерации и введен в действие в 1983 году. По принятым техническим решениям и безопасности энергоблока соответствуют нормам и требованиям, предъявляемым к АЭС с ВВЭР второго поколения. Учитывая длительный срок работы 1 реактора ЮУ АЭС, следует считать вопросы повышения его экологической безопасности особо актуальными.

Анализ последних достижений и публикаций

После Чернобыльской катастрофы мировое сообщество пересмотрело подходы к оценке уровня безопасности всех действующих энергоблоков. С этой целью в период с 1992 года по 1998 на всех атомных станциях Украины были проведены международные миссии для проверки соответствия уровня безопасности действующих ядерных установок международным требованиям. По результатам миссий МАГАТЭ были разработаны рекомендации, которые изложены в документе “Проблемы безопасности атомных электростанций с реакторами ВВЭР 1000/440 и их категории” IAEA-EBR-WWER-05 [1,2]. С целью реализации рекомендаций МАГАТЭ и выполнения обязательств Украины в соответствии с Конвенцией о ядерной безопасности НАЭК “Энергоатом” была разработана Комплексная программа модернизации и повышения безопасности атомных электростанций” [2,3]. В последнее время в мировой практике находит применение для оценки экологической безопасности атомных реакторов вероятностный анализ безопасности, который является действенным и эффективным механизмом оценки рисков эксплуатируемых и действующих реакторов [2,4]. Так, на его основе выполнен анализ безопасности 2-го блока Хмельницкой и 4-го блока Ровенской АЭС [2], который позволил наметить основные мероприятия по повышению безопасности. Исследованию либерализации мирового рынка электроэнергии и мероприятиям по повышению эффективности и безопасности АЭС посвящены

работы [5], где также указывается на мировой опыт повышения безопасности АЭС.

Невозможность предусмотреть различные варианты возникновения чрезвычайной ситуации и роль человеческого фактора делает актуальным разработку и внедрение глубоко эшелонированной защиты на АЭС [3].

Целью работы является повышение экологической безопасности 1-го энергоблока Южно-Украинской АЭС на основе разработки и внедрения концепции глубоко эшелонированной защиты.

Результаты исследований

Концепция глубоко эшелонированной защиты разработана с целью повышения экологической безопасности станции и в связи с мероприятиями по продлению ресурса работы 1-го энергоблока ЮУ АЭС. Она предусматривает общую стратегию осуществления мероприятий для обеспечения безопасности на станции. Концепция базируется на принципах: ни одна единичная ошибка персонала или механический отказ не должны привести к ущербу для населения и окружающей среды; комбинация маловероятных отказов не приведет вовсе или приведет к незначительному ущербу. Это обеспечивается созданием серии барьеров, не имеющих потенциальных угроз, а в форс-мажорных условиях защищающих, вплоть до своего разрушения, человека и окружающую среду от негативных событий. Представление принципа глубоко эшелонированной защиты приведено на рис. 1.

На рисунке представлены события и пути их развития в соответствии с их тяжестью. Классы событий начинаются с состояний нормальной эксплуатации, при которых не возникает никаких опасностей для станции. Возмущения от ожидаемых аномальных событий погашаются непосредственно в результате правильного срабатывания систем нормальной эксплуатации. Более тяжелые возмущения могут быть связаны с третьей категорией сложных эксплуатационных событий, входящих в диапазон проектных аварий. Для этих событий в дополнение к защите, обеспечиваемой системами нормальной эксплуатации станции, могут быть добавлены инженер-

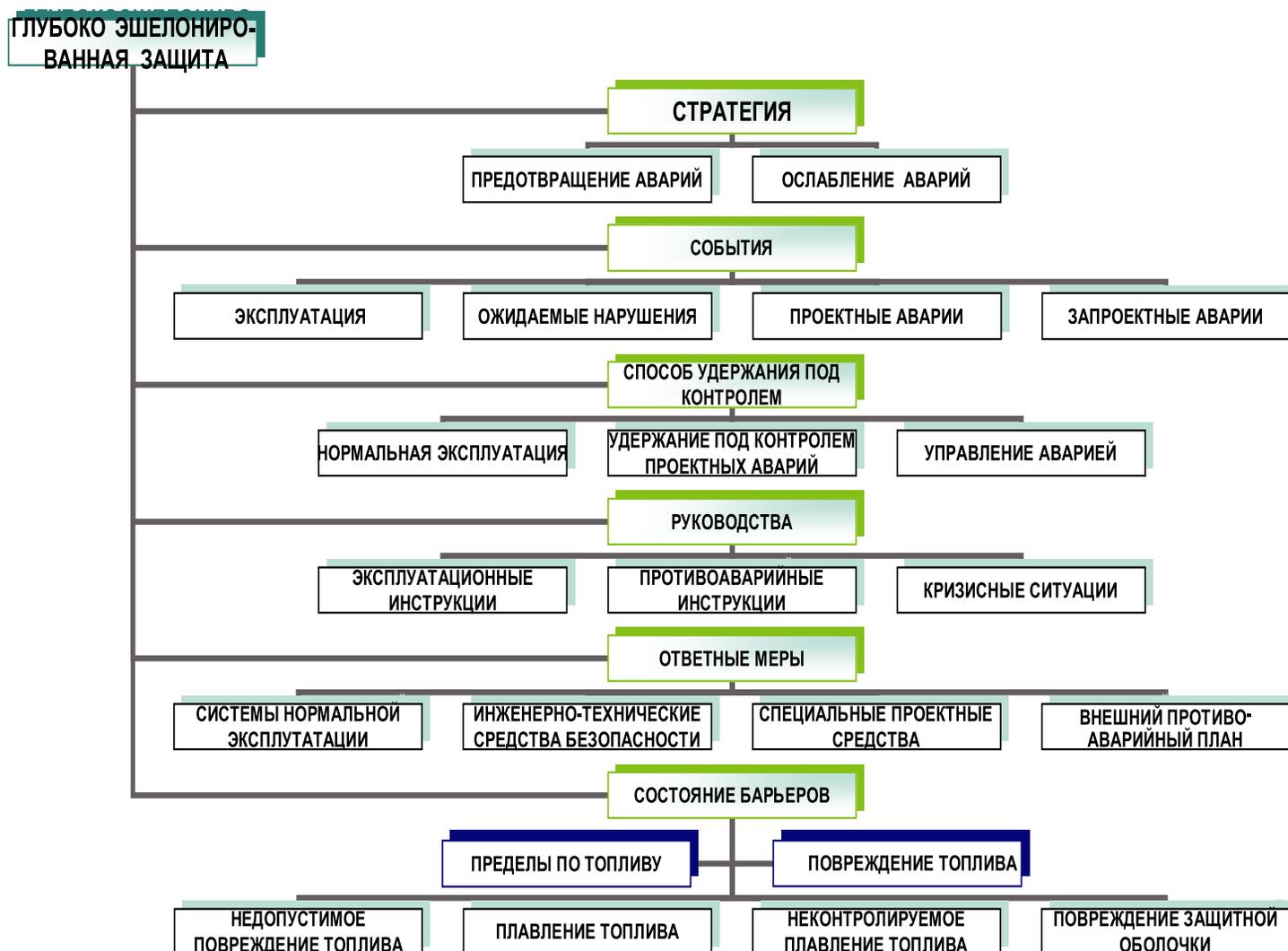


Рис. 1. Представление принципа глубоко эшелонированной защиты.

но-технические средства безопасности для управления аварией. Самыми последними по шкале тяжести событий являются запроектные аварии; для них необходимы меры по управлению аварией, которые могут ослабить последствия нарушений.

Надежность физических барьеров повышается в результате применения к ним серии дополнительных мер. Деятельность персонала направлена на защиту целостности этих барьеров (административный контроль, эксплуатационные пределы, аттестация и подготовка персонала, ведомственный надзор, пожарная безопасность, физическая защита). Структура взаимодействия между физическими барьерами и уровнями за-

щиты в концепции принципа глубоко эшелонированной защиты представлена на рис. 2.

Сущность концепции заключается в обеспечении защиты следующих четырех физических барьеров на пути распространения радиоактивных веществ: топливная матрица; оболочка ТВЭЛ; границы теплоносителя первого контура; контаймент. Система технических и организационных мер образует 5 уровней глубоко эшелонированной защиты. Создание условий, предотвращающих нарушения нормальной эксплуатации образует первый уровень. К нему относится оценка и выбор площадки, пригодной для размещения атомной станции, разработка проекта реакторной установки на основе консервативного подхо-

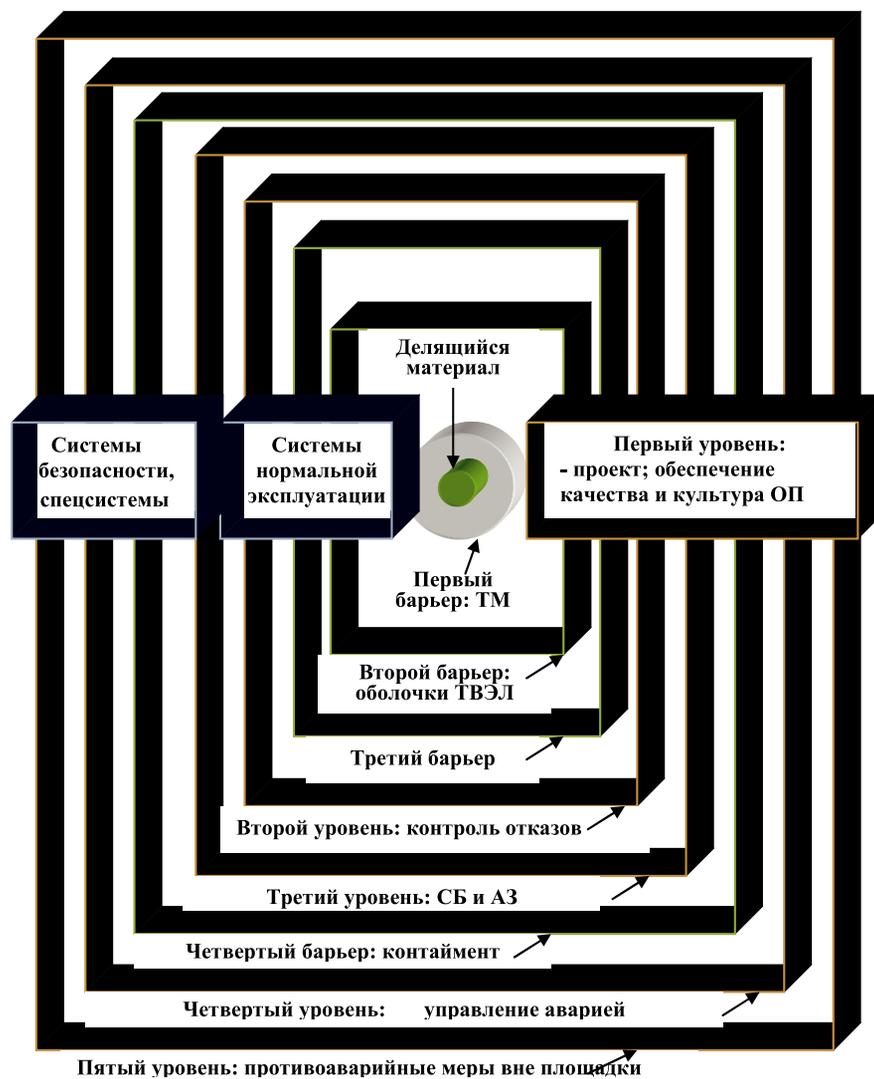


Рис. 2. Структура взаимодействия между физическими барьерами и уровнями глубоко эшелонированной защиты для ЮУ АЭС.

да с высокими показателями защиты. Сюда также входит обеспечение требуемого качества систем и элементов АС и выполняемых работ, эксплуатация станции в соответствии с требованиями нормативных документов, технологических регламентов и инструкций по эксплуатации. Важными элементами первого уровня являются поддержание на основе диагностики в исправном состоянии систем и элементов, важных для безопасности, принятие профилактических мер к выявленным дефектам, замена оборудования, выработавшего ресурс, и организация эффективно действующей системы документирования результатов работ и контроля. Подбор персонала АС и обеспечение необходимого уровня его ква-

лификации для действий в условиях нормальной эксплуатации и при аварийных ситуациях и авариях, формирование культуры безопасности являются заключительным звеном этого уровня защиты.

Предотвращение проектных аварий системами нормальной эксплуатации образует второй уровень. Сюда также относится своевременное выявление отклонений от нормальной работы и их устранение и управление при нарушениях нормальной эксплуатации.

Предотвращение аварий системами безопасности образует третий уровень. Он реализуется предотвращением развития отказов оборудования и ошибок персонала в проектные аварии, а

проектных аварий – в запроектные с применением систем безопасности. Этот уровень обеспечивает ослабление последствий аварий, которые не удалось предотвратить, путем удержания выделяющихся радиоактивных веществ локализирующими системами безопасности.

Управление запроектными авариями образует четвертый уровень. Он обеспечивает предотвращение развития запроектных аварий и ослабление их последствий, защиту герметичного ограждения от разрушения при запроектных авариях и поддержание его работоспособности. Главным итогом работы уровня является возвращение АС в контролируемое состояние, при котором прекращается цепная реакция деления, обеспечивается постоянное охлаждение ядерного топлива и удержание радиоактивных веществ в установленных границах.

Планирование мероприятий по защите персонала и населения образует пятый уровень. К нему относится установление санитарной зоны и зоны наблюдения вокруг АС, подготовка и осуществление при необходимости планов мероприятий по защите персонала и населения.

Концепция глубоко эшелонированной защиты осуществляется на всех этапах жизненного цикла АС. Приоритетной при этом является стратегия предотвращения исходных событий, особенно для первого и второго уровней. Соответственно методологии МАГАТЭ приняты четыре категории проблем безопасности, отражающих степень нарушения уровней защиты:

1. Категория I: Проблемы, отнесенные к категории I, отражают отклонение от общепринятой международной практики. Целесообразно обращаться к ним как к части действий при решении проблем с более высоким приоритетом.

2. Категория II: Проблемы, отнесенные к категории II, вызывают беспокойство за безопасность. «Глубокоэшелонированная защита» понижена. Требуется предпринять действия для решения данной проблемы.

3. Категория III: Проблемы, отнесенные к категории III, вызывают большое беспокойство за безопасность. «Глубоко эшелонированная защита» недостаточна. Необходимы немедленные компенсирующие меры. Также могут быть необходимы временные меры.

4. Категория IV: Проблемы, отнесенные к категории IV, вызывают беспокойство за безопасность в высшей степени. «Глубоко эшелонированная защита» неприемлема. Необходимы немедленные корректирующие действия.

Описанная методология оценки влияния проблем безопасности на глубоко эшелонированную защиту основана на консервативных экспертных оценках степени нарушения пяти уровней защиты. При этом оценка этих нарушений выполняется в некоторых случаях недостаточно глубоко, без всесторонней и детальной инженерной проработки. Тем не менее, такая оценка правильно определяет принципиальные моменты снижения того или иного уровня защиты. Однако существуют более точные методы для того, чтобы дать максимально точную оценку степени нарушения того или иного уровня защиты и, исходя из этой оценки, определить конкретные мероприятия, которые требуются для решения проблемы.

Большинство аспектов безопасности АС тесно связаны с четырьмя основными функциями безопасности: управлением мощностью; охлаждением активной зоны; сохранением границ первого контура; ограничением выхода радиоактивности. Согласно нормативным документам ОПБ-82 (основной нормативный документ, применяемый при проектировании энергоблока № 1 ЮУ АЭС), ПБЯ РУ АС-89 системы безопасности, обеспечивающие вышеуказанные функции безопасности атомной станции, включают в себя защитные, локализирующие, обеспечивающие и управляющие системы. Защитные системы предотвращают или ограничивают повреждение ядерного топлива, оболочек ТВЭЛ и 1-го контура. Локализирующие СБ предназначены для предотвращения или ограничения распространения радиоактивных веществ и выхода их наружу при авариях. Управляющие системы безопасности осуществляют приведение в действие СБ, контроль и управление ими в процессе выполнения заданных функций. Обеспечивающие системы снабжают СБ энергией, рабочей средой и создают условия для их функционирования.

Для обеспечения уровней защиты, все системы безопасности 1-го энергоблока ЮУ АЭС выполнены по каналному принципу. Каждый канал состоит из функциональных групп

защитных, локализирующих, обеспечивающих и управляющих систем безопасности. По своей производительности, быстрдействию и прочим факторам каждый канал достаточен для обеспечения радиационной и ядерной безопасности атомной станции в любом из режимов ее работы, включая режим максимальной проектной аварии. Независимость трех каналов системы безопасности достигается за счет: полного разделения каналов в технологической части; полного разделения каналов системы безопасности в части электроснабжения и АСУ ТП. В аварийных ситуациях осуществляется автоматический запуск в работу систем безопасности.

Для обеспечения безопасности на энергоблоке № 1 ЮУ АЭС приняты меры, направленные на предотвращение нежелательных переходных процессов, связанных с изменением реактивности, и на останов реактора в случае необходимости. Регулирование мощности реактора и гашение реакции деления производится двумя системами воздействия на реактивность, основанными на разных принципах: системой механического перемещения регулирующих стержней в активной зоне (система управления и защиты) и системой изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе. С помощью первой системы производятся изменения реактивности при работе на мощности и останов реактора при нормальных условиях эксплуатации и авариях.

В режимах работы на мощности в условиях нормальной эксплуатации управление реактором осуществляет система автоматического регулирования мощности. При возникновении режимов нарушения нормальной эксплуатации и аварийных режимах система автоматического регулирования отключается и вводится в действие система аварийной защиты 1,3,4 родов в зависимости от исходного события. В состав системы управления входят: датчики технологических параметров; вторичные приборы, формирующие сигналы АЗ; аппаратура контроля нейтронного потока; электрооборудование СУЗ; приводы органов регулирования СУЗ; органы регулирования.

Система управления и защиты функционирует во всех проектных режимах, в частности система автоматического регулирования мощности —

в режимах нормальной эксплуатации, аппаратура контроля нейтронного потока, датчики технологических параметров, система силового управления, система электропитания, система контроля положения органов регулирования — во всех проектных режимах. Управление распределением энерговыделения в активной зоне осуществляется с помощью специально предусмотренных для этих целей групп органов регулирования СУЗ. Все ОР СУЗ являются исполнительными органами аварийной защиты. По предупредительным сигналам группы ОР СУЗ последовательно вводятся в активную зону с рабочей скоростью либо происходит сброс отдельной группы для ускоренной разгрузки блока, или формируется запрет на движение ПС СУЗ вверх. По сигналу аварийной защиты происходит падение ПС СУЗ в активную зону за время не более 4 секунд, приводящее к максимальной скорости снижения мощности реактора. Для изменения мощности реактора может также использоваться система борного регулирования.

Для охлаждения активной зоны основные принципы безопасности, реализованные на 1 блоке ЮУ АЭС следующие: предусмотрены альтернативные средства для восстановления и поддержания охлаждения топлива при аварийных условиях, даже в случае отказа нормальной системы теплоотвода или нарушении целостности границы системы охлаждения первого контура. Основным оборудованием РУ, обеспечивающим отвод теплоты из активной зоны реактора путем создания циркуляции теплоносителя в первом контуре, является главный циркуляционный насос ГЦН-195М. При отводе теплоты через систему второго контура центральная роль в охлаждении активной зоны реактора в рабочих и переходных режимах отводится парогенератору. Парогенератор обеспечивает охлаждение теплоносителя первого контура до требуемого уровня температур во всех проектных режимах. Процесс отвода остаточной теплоты и охлаждения первого контура на первом этапе расхолаживания реактора осуществляется через систему байпаса в конденсатор турбины БРУ-К. В случае потери внешнего электроснабжения АЭС отвод остаточной теплоты осуществляется через сбросные клапаны БРУ-А или через предохранительные

клапаны парогенераторов в случае невозможности функционирования других систем. Если система подачи питательной воды не функционирует, подача питательной воды обеспечивается системой аварийной питательной воды. Долговременное расхолаживание реактора при холодном остове осуществляется с использованием системы аварийного охлаждения низкого давления.

Для сохранения границ первого контура 1 блока ЮУ АЭС реализованы следующие основные принципы безопасности: нормы и стандарты по корпусам и трубопроводам дополнены мерами по предотвращению условий, которые могли бы привести к повреждению границы системы теплоносителя в любое время в течение всего срока службы. Граница теплоносителя представляет собой ключевую систему, поскольку ее нарушение может привести к уменьшению возможностей охлаждения активной зоны и в экстремальных случаях к потере функции удержания радиоактивного топлива. Выполнение данной функции безопасности осуществляется своевременным контролем целостности компонентов первого контура. Для подтверждения надежности первого контура проводятся испытания на плотность и прочность давлением, превышающим поддерживаемое рабочее давление. Обеспечение соответствующей защиты от превышения давления предотвращает угрозу целостности контура реактора. На энергоблоке № 1 ЮУ АЭС функцию указанной защиты выполняют импульсно-предохранительные устройства, предохранительные клапаны и быстродействующие редуцирующие устройства. Для защиты I контура от превышения давления на компенсаторе давления установлены три комплекта ИПУ, состоящие из предохранительного клапана и управляющих импульсных клапанов. Сбрасываемая радиоактивная среда после ИПУ КД направляется в барботажный бак. Для защиты II контура от превышения давления на паропроводах установлены сбросные устройства в конденсатор турбины БРУ-К и на каждом паропроводе от ПГ БРУ-А и предохранительные клапаны ПК ПГ для сброса пара в атмосферу. При этом БРУ-К является устройством нормальной эксплуатации, а БРУ-А и ПК ПГ выполняют также функции защитной системы безопасности.

Система аварийного газоудаления предназначена для удаления из I-го контура парогазовой смеси при аварийной ситуации, связанной с оголением активной зоны и возникновением парциркуционной реакции, а также в аварийных ситуациях, связанных с возможностью вскипания теплоносителя в активной зоне реактора. Система аварийного газоудаления I-го контура является системой важной для безопасности и относится к защитам СБ. Система аварийной подпитки ПГ предназначена для подачи питательной воды в ПГ в аварийных режимах, связанных с обесточиванием блока или нарушением нормальной подачи питательной воды в ПГ. Система включается автоматически по сигналам защит при снижении уровня ПВ в ПГ ниже установленного уровня. Система аварийной подпитки является важной для безопасности и относится к защитной системе.

Основные принципы безопасности для ограничения выхода радиоактивности, реализованные на 1 блоке ЮУ АЭС, следующие: энергоблок спроектирован таким образом, чтобы обеспечить удержание массы радиоактивных веществ, которая может высвободиться из топлива во всем диапазоне аварий, рассматриваемых в проекте. Для удержания радиоактивных веществ, которые могут высвободиться в результате аварии, существует система локализации аварий. СЛА предназначена для предотвращения или ограничения распространения выделяющихся при авариях радиоактивных веществ за установленные проектом границы зоны локализации или выхода их в окружающую среду в количествах, не превышающих безопасных пределов. На случай возникновения в реакторном отделении АЭС аварийной ситуации с потенциально возможным выходом в окружающую среду продуктов деления, на пути последних проектом предусмотрены три барьера, которые обеспечивают безопасную эксплуатацию АЭС в пределах санитарно-защитной зоны вокруг АЭС, установленной проектом. При нарушении целостности первых трех барьеров безопасности продукты деления будут задержаны последним барьером – системой локализации аварии.

На энергоблоке № 1 ЮУ АЭС некоторые основные принципы, такие как физическое и

Таблица 1. Основные функции безопасности, реализованные на 1 блоке ЮУ АЭС

Функции/подфункции безопасности	Установленные необходимые системы и оборудование
Управление реактивностью	
Аварийный останов реактора	Механическая ОР СУЗ - АЗ-1 АКНП, аппаратура АЗ
Ввод бора в 1-й контур	Система продувки-подпитки и борного регулирования, САОЗ ВД, ГЕ САОЗ, плунжерные насосы
Управление реактивностью	ГЦН
Обеспечение запаса теплоносителя в первом контуре	
Обеспечение запаса ТН в 1-к системой ТК	Система продувки-подпитки и борного регулирования
Обеспечение запаса ТН в 1-к САОЗ ВД	САОЗ ВД
Обеспечение запаса ТН в 1-к ГЕСАОЗ	ГЕ САОЗ
Обеспечение запаса ТН в 1-к САОЗ НД	САОЗ НД в режиме работы через приемок гермозоны
Отвод тепла по второму контуру	
Подпитка парогенераторов	Система вспомогательной питательной воды (ВПЭН)
Подпитка парогенераторов	Система аварийной питательной воды (АПЭН)
Поддержание давления во 2-к	БРУ-А; БРУ-К; ПК ПГ
Расхолаживание по 2-к	БРУ-А; БРУ-К
Отвод тепла по первому контуру	
Расхолаживание по 1-к	ГЕ САОЗ
Расхолаживание по 1-к и отвод остаточных ТВ	САОЗ ВД в режиме аварийного впрыска в 1 контур из бака САОЗ ВД и САОЗ НД и с бака/приямка ГО и по линии планового расхолаживания
Управление давлением первого контура	
Управление давлением 1к	Система компенсации давления 1-к (впрыск в КО от ГЦН и от ТК), системы аварийного газоудаления
Защита 1к от превышения давления	Система защиты 1к (ИПУ КД)
Изоляция парогенератора	
Изоляция ПГ по 1-к	ГЗЗ (для блоков 1,2)
Изоляция ПГ по пару	БЗОК
Изоляция ПГ по ПВ	Регуляторы основной и аварийной ПВ
Обеспечение электроснабжения	
Аварийное ЭС	Система надежного ЭС (ДГ) и АБП
Восстановление ЭС	Система нормального ЭС
Изоляция течи первого контура за пределы ГО	
Изоляция течи в системе продувки -подпитки	Система продувки-подпитки
Локализация ГО	
Удержание активных ПД во всех режимах эксплуатации АЭС	Система герметичного ограждения (СГО)
Локализация аварии и расхолаживание ГО	Спринклерная система

функциональное разделение между каналами систем, важных для эксплуатации, и каналами систем безопасности, в полной степени не применялись из-за отсутствия надлежащих правил и стандартов на стадии проектирования блоков АЭС с блоками ВВЭР-1000 “малых серий” (например, САОЗ и аварийные питательные насосы).

Это потребовало доработки принципов безопасности, которые были успешно реализованы на 1 энергоблоке ЮУ АЭС, их перечень также представлен в таблице.

Вместе с тем блоки “малой серии” обладают некоторыми преимущественными особенностями проекта по сравнению с РУ В-320. Например, они имеют независимые баки запаса борного раствора по каналам САОЗ НД, запас до 1000м³ обессоленной воды для аварийной подачи пита-

тельной воды на ПГ, возможна подача аварийной питательной воды на любой ПГ от любой АПЭН, надежное электропитание насосов подпитки первого контура, подогрев баков ГЕ САОЗ, большой свободный объем ГО, отсежные задвижки перед БРУ-А и др.

Выводы

Внедрение концепции глубоко эшелонированной защиты и мероприятий по ее реализации на 1-м энергоблоке ЮУ АЭС показало, что существующие системы обеспечивают экологическую безопасность при любой проектной аварии и позволяют принимать компенсирующие меры в соответствии с возникающими категориями проблем безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *НП 306.1.02./1.034-2000*. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБУ-2000). Утверждено ГАЯР Украины. – 1999 г.
2. *Доклад* о состоянии ядерной и радиационной безопасности в Украине в 2005 г. // Госатомрегулирования, Киев, 2006 г., 50 с.
3. *Основные* принципы безопасности атомных станций. //Серия безопасности № 75. INSAG-3, IAEA, Vienna, – 1988.

4. *Зендюк Д.А.* Анализ безопасности энергоблоков ХАЭС-2 и РАЭС -4 // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26, №6. – С. 152–156.

5. *Долинский А.А., Домашев Е.Д., Свириденко И.И.* Либерализация мирового рынка электроэнергии как условие повышения эффективности и безопасности АЭС // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 1. – С. 49–62.

Получено 18.01.2007 г.