

В. И. Колтаков, Н. А. Стефанишин,
С. А. Остапчук

Государственный научно-технический центр
по ядерной и радиационной безопасности, г. Киев, Украина

Эволюция проектов реакторных установок ВВЭР-1000

Описана эволюция проектов реакторных установок с ВВЭР-1000 различных модификаций. Рассмотрены отличия, внесенные в проекты реакторных установок нового поколения с целью повышения безопасности и надежности. Дано краткое описание новых пассивных систем безопасности, принципиально влияющих на предотвращение запроектных аварий и смягчение последствий тяжелых аварий. Представлены сравнительные данные по системам и показателям безопасности проектов ВВЭР-1000 разных поколений.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, повышение безопасности, системы безопасности, пассивные системы.

В. И. Колтаков, М. О. Стефанишин, С. А. Остапчук

Еволюція проектів реакторних установок ВВЕР-1000

Описано еволюцію проектів реакторних установок з ВВЕР-1000 різних модифікацій. Розглянуто відмінності, внесені в проекти реакторних установок нового покоління з метою підвищення безпеки і надійності. Надано стислий опис нових пасивних систем безпеки, що принципово впливають на запобігання запроектним аваріям і пом'якшення наслідків важких аварій. Представлено порівняльні дані по системах і показниках безпеки проектів ВВЕР-1000 різних поколінь.

Ключові слова: АЕС, ВВЕР, підвищення безпеки, системи безпеки, пасивні системи.

© В. И. Колтаков, Н. А. Стефанишин, С. А. Остапчук, 2011

В бывшем СССР работы по проектированию энергоблока с ВВЭР мощностью 1000 МВт начались в 1966 г., а пуск осуществлен в 1980 г. Этот энергоблок, получивший обозначение В-187, послужил прототипом серийных реакторных установок (РУ) и установок повышенной безопасности нового поколения. В настоящее время в мире эксплуатируется и находится на стадии пуска более 30 энергоблоков с ВВЭР-1000 различной модификации, 13 из них — в Украине: три — на Южно-Украинской АЭС (В-302/В-332/В-320), шесть — на Запорожской АЭС (В-320), по два блока (В-320) — на Ровенской и Хмельницкой АЭС.

После переоценки безопасности проектов всех РУ (В-302/В-332/В-320) украинских АЭС в процессе эксплуатации энергоблоков внедрены мероприятия по модернизации оборудования и систем, важных для безопасности, обеспечена достаточно высокая степень надежности и безопасности эксплуатации этих энергоблоков. Однако для исходных событий аварий с наложением полного обесточивания энергоблока угроза повреждения активной зоны не исключается.

Энергоблоки с РУ В-320 эксплуатируются в Российской Федерации (РФ), Болгарии и Чехии. В Китае, Индии и Иране введены в эксплуатацию энергоблоки нового поколения В-428, В-412 и В-446, соответственно.

Вопрос о дальнейшем развитии ядерной энергетики в Украине сегодня довольно актуален. Энергетическая стратегия Украины в период до 2030 года [1] предполагает увеличение располагаемых мощностей путем строительства новых и замещения эксплуатируемых энергоблоков, заканчивающих свой проектный срок эксплуатации, таких, например, как энергоблок № 1 Южно-Украинской АЭС, проектный срок эксплуатации которого (30 лет) заканчивается в 2012 г. Решение о выборе новых проектов перед строительством энергоблоков в рамках реализации Энергетической стратегии [1] потребует знаний об уровне безопасности и надежности существующих разработок РУ нового поколения.

Цель статьи — представить качественное описание эволюции проектов реакторных установок с ВВЭР-1000 и показать последовательное создание и реализацию новых эффективных технических решений, принципиально влияющих на повышение безопасности и надежности в любых режимах эксплуатации РУ, учитывающих запроектные и тяжелые аварии.

Развитие проектов РУ с ВВЭР-1000. Традиционно проекты РУ с ВВЭР-1000 (рис. 1) классифицированы следующим образом:

В-187 — энергоблок № 5 Ново-Воронежской АЭС (НВАЭС), РФ — первый ВВЭР-1000, прототип серийных проектов;

В-302 и В-338 — энергоблоки «малой серии», такие как энергоблоки №№ 1, 2 ЮУАЭС и № 1,2 Калининской АЭС (КАЭС), РФ;

В-320 — энергоблоки «большой серии», серийные РУ;

РУ ВВЭР-1000 повышенной безопасности — В-392Б (энергоблоки №№ 5, 6 Балаковской АЭС (БАЭС, РФ), В-412 (АЭС «Кудамкулан», Индия), В-428 (АЭС «Тяньвань», Китай), В-446 (АЭС «Бушер», Иран), В-466 (АЭС «Белене», Болгария).

На этом проектирование РУ с ВВЭР-1000 в настоящее время закончено. Дальнейший этап связан с проектами РУ большей мощности 1200–1500 МВт, такими как проект

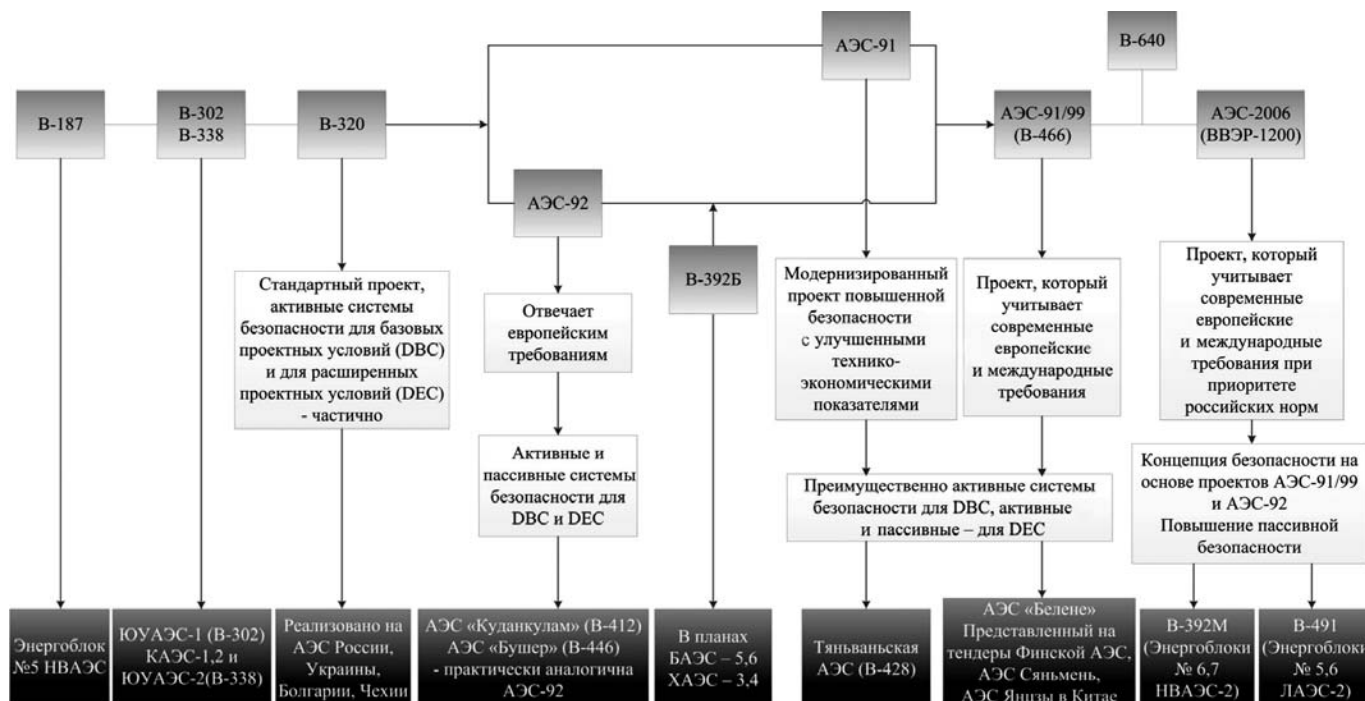


Рис. 1. Эволюция проектов РУ с ВВЭР-1000

АЭС-2006, реализованный на энергоблоках №№ 6, 7 второй очереди НВАЭС (НВАЭС-2) и №№ 5, 6 второй очереди Ленинградской АЭС (ЛАЭС-2).

Повышение безопасности новых проектов РУ с ВВЭР-1000 основано на современных достижениях науки и оптимальном сочетании многоканальных активных и пассивных систем безопасности с применением принципов резервирования, функционального разнообразия, совмещения функций и физического разделения.

Генеральный конструктор и проектировщики АЭС с ВВЭР при разработке новых проектов придерживаются ряда критериев [2], которые в более широком виде могут быть использованы в качестве критериев для выбора проектов новых энергоблоков в Украине, а именно:

1) *проектные критерии:*

применяемая технология (ВВЭР, EPR, PWR, Candu, AREVA, AP1000, БН);

единичная мощность энергоблока (600, 1000, 1200, 1500 МВт);

проектный термин эксплуатации (30–60 лет);

2) *критерии безопасности:*

соответствие рекомендациям МАГАТЭ и зарубежным стандартам по безопасности (требования нормативной базы России, Европы и США);

оптимальность сочетания активных и пассивных систем безопасности (СБ);

системы предотвращения и ослабления последствий запроектных и тяжелых аварий;

количественные критерии безопасности (частота повреждения активной зоны — ЧПАЗ, частота предельного аварийного выброса — ЧПАВ);

3) *технические критерии:*

коэффициент использования установленной мощности (КИУМ);

коэффициент полезного действия (КПД) и расход электроэнергии на собственные нужды;

дозозатраты оперативного и ремонтного персонала;

работа в маневренном режиме и условия топливоиспользования;

лицензирование проекта энергоблока;

использование существующей инфраструктуры и сооружений;

требуемые сроки ввода в эксплуатацию;

4) *экономические критерии:*

удельные капиталовложения;

эксплуатационные расходы.

Основное оборудование проектов с ВВЭР-1000. В табл. 1 приводится сравнение характеристик основного оборудования находящихся в эксплуатации реакторных установок (В-187, В-302, В-338, В-320) с новыми проектами повышенной безопасности: В-392, В-428, В-446, В-412 и В-466 [3], [5]. Характеристики и параметры РУ и основного оборудования В-428 и В-446 идентичны по характеристикам и параметрам РУ В-392, а В-412 — В-466; отличия заключаются в системах безопасности, требованиях к сейсмостойкости для отдельных площадок и компоновке петель главного циркуляционного контура для В-446, поэтому в табл. 1 приведены показатели новых проектов В-392 и В-412.

Активная зона реактора В-187 формируется из 151 касеты чехлового типа, регулирующие органы имеют 109 приводов с кластерными сборками из 12 поглощающих элементов. Активные зоны РУ малой и большой серии состоят из 163 бесчехловых ТВС и отличаются количеством ОР СУЗ. На энергоблоке № 1 ЮУАЭС в РУ В-302 установлено 49 ОР СУЗ, число поглощающих элементов в кластерной сборке увеличено с 12 до 18. Из-за недостаточной эффективности карбида бора (B_4C), примененного в поглощающих элементах, ИАЭ им. И. В. Курчатова, проведя специальные дополнительные расчеты, показал необходимость увеличения количества регулирующих органов. В реакторных установках В-338 и В-320 количество ОР СУЗ увеличено до 61.

В проектах РУ нового поколения применена усовершенствованная конструкция реактора и внутрикорпусных

Таблица 1. Характеристики основного оборудования РУ с ВВЭР-1000

Наименование	Проекты РУ					
	В-187	В-302	В-338	В-320	В-392/ В-428/446	В-412/466
Проектный срок службы, лет	РУ — 30, корпус реактора и ПГ*1 — 40				РУ — 40 корпус реактора и ПГ — 50	
<i>Корпус реактора:</i>						
длина	10897 мм				11185 мм	
место установки образцов-свидетелей	В шахте реактора				На стенке корпуса	
материал	Сталь 15Х2НМФА Сталь 15Х2НМФА-А				Сталь 15Х2НМФА-А Сталь 15Х2НМФА-кл1	
Внутрикорпусные устройства: перемещения ВКУ*2 при поперечном разрыве шахты	До 80 мм				До 5 мм	
Верхний блок: количество приводов СУЗ*3	109	49	61	61	85–121	121
общее количество патрубков	128	80	92	92	141	141
термоконтроль	98	98	98	98	-	-
КНИ (КНИТ*4)	64	64	64	64	46	46
КНИТ с функцией индикации уровня	-				4	4
КНИТ с замером температуры под крышкой	-				4	4
Привод СУЗ:						
тип	ЛШП	ШЭМ			ШЭМ-3	
срок службы	5 лет				30 лет	
датчик перемещения	ДПЛ				ДПШ	
Тепловыделяющая сборка (ТВС):	Чехловая ТВС	Бесчехловая ТВС			Усовершенствованная бесчехловая ТВС	
количество в активной зоне	151	163			163	
материал каркаса	Сталь				Zr+1 %Nb	
длительность кампании	2...3 года				3...4 года	
выгорание	27 МВт·сут/кгU 43 МВт·сут/ кгU				43 МВт·сут/кгU	
ПЗ*5 СУЗ:						
срок службы	5 лет				10 лет	
количество ПЭЛ*6	12	18				
поглотитель	В ₄ С				Dy ₂ O ₃ ; TiO ₂ ; В ₄ С	
Тип ГЦН*7:	ГЦН-195	ГЦН-195М			ГЦНА-1391	
смазка подшипников	Внешняя масляная система				Подшипник смазывается и охлаждается водой	
электродвигатель	Однокоростной				Двухкоростной	
смазка	Турбинное масло				Негорючая смазка	

*1 ПГ — парогенератор, *2 ВКУ — внутрикорпусные устройства, *3 СУЗ — система управления и защиты, *4 КНИТ — канал нейтронный измерительный с температурным контролем, *5 ПЗ — предупредительная защита, *6 ПЭЛ — поглощающий элемент, *7 ГЦН — главный циркуляционный насос

устройств. Повышена эффективность аварийной защиты за счет увеличения количества ОР СУЗ (до 85–121), что позволяет поддерживать реактор в подкритическом состоянии при расхолаживании до 100 °С без ввода борного раствора.

Главный циркуляционный контур (ГЦК) состоит из реактора и четырех циркуляционных петель. Каждая циркуляционная петля включает парогенератор (ПГ), главный циркуляционный насос (ГЦН), главные циркуляционные трубопроводы (ГЦТ), соединяющие оборудование петли с реактором, и для реакторных установок В-187

и В-302/338 — две главные запорные задвижки Ду850 (ГЗЗ) на холодной и горячей нитках каждой циркуляционной петли. ГЗЗ, в случае необходимости, позволяют отключить петли и эксплуатировать РУ на соответствующем уровне мощности. Циркуляционные петли РУ В-320 и последующих проектов в отличие от РУ В-187 и В-302/338 не имеют ГЗЗ, вследствие чего оптимизируется компоновка РУ, уменьшаются длина и сопротивление петель, что улучшает гидравлические характеристики ГЦК; кроме того, уменьшается количество сварных швов на ГЦТ на 16 шт., что повышает надежность первого контура.

В проектах РУ нового поколения применены ПГ повышенной эксплуатационной надежности за счет улучшения конструкции крепления пучка теплообменных труб и ГЦ-НА-1391 с уплотнением вала, исключающим течь теплоносителя при обесточивании энергоблока в течение 24 ч, что позволяет сохранить плотность ГЦК при отсутствии подачи запирающей воды ГЦН.

Важной особенностью эволюции проекта РУ с ВВЭР-1000 и прогресса проектирования РУ на современном этапе является модернизация систем контроля и управления (СКУ) РУ с использованием современных достижений науки и техники, которые позволяют предотвращать или исключать ошибку оператора: для пуска системы необходимо соблюдение всех требуемых проектом параметров вспомогательных или обеспечивающих систем, при этом отсутствие хотя бы одного параметра не позволит оператору принудительно привести систему в действие. При проектировании СКУ РУ основной акцент ставился на выполнение требований ядерной безопасности, предъявляемых к эффективности ОР СУЗ реактора, которые должны обеспечить подкритичность активной зоны при останове реактора, и к пассивным системам безопасности, которые в случае отказа СУЗ должны обеспечить быстрый ввод жидкого поглотителя и привести реактор в подкритическое состояние.

Системы безопасности РУ с ВВЭР-1000. СБ предназначены для приведения РУ в безопасное состояние в случае возникновения аварийной ситуации. В проектах «малой» и «большой» серий ВВЭР-1000 преимущественно используются активные СБ, работа которых зависит от состояния обеспечивающих систем (электроснабжение, охлаждение, смазка и т. п.). Единственной пассивной СБ в этих проектах являются гидроемкости (ГЕ) системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ). В серийных установках с ВВЭР-1000 для всех активных СБ принята кратность резервирования 3×100 %.

В общем виде активная часть СБ всех проектов РУ ВВЭР-1000 включает:

- САОЗ высокого давления;
- САОЗ низкого давления;
- систему защиты первого контура от превышения давления;
- систему защиты второго контура от превышения давления;
- систему аварийного газоудаления;
- систему аварийной подачи питательной воды.

В проекты СБ заложены принципы независимости, разнообразия принципов работы, физического разделения каналов и единичного отказа. Данные системы выполняют следующие функции, необходимые для управления аварийными процессами и приведения РУ в безопасное состояние:

- управление реактивностью, обеспечение подкритичности реактора;
- обеспечение запаса теплоносителя первого контура;
- осуществление расхолаживания РУ и обеспечение отвода остаточных тепловыделений от активной зоны реактора;
- защита первого и второго контура от превышения давления.

Кроме того, после аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд», которая из-за отсутствия возможности удаления парогазовой смеси из первого контура привела к срыву естественной циркуляции и последующему повреждению активной

зоны, спроектирована система аварийного газоудаления. Система предназначена для удаления парогазовой смеси из-под крышки реактора и крышек коллекторов ПГ в аварийных ситуациях, связанных с течами первого контура, или в случае тяжелых аварий с возникновением парциркуляционной реакции.

Состав систем безопасности РУ ВВЭР-1000 нового поколения. После аварии на Чернобыльской АЭС было принято решение о разработке проектов АЭС с ВВЭР повышенной безопасности. Повышение безопасности проектируемых энергоблоков обуславливалось пересмотром и ужесточением требований многих направлений в сфере безопасности ядерной энергетики. Были дополнены общие положения безопасности АЭС, правила ядерной и радиационной безопасности, требования к прочностным расчетам и ряд других. В новых проектах предусматривалось, что основной вклад в предотвращение и управление запроектными и тяжелыми авариями должны вносить СБ, работа которых основана на пассивном принципе действия. Значительную модернизацию претерпели активные СБ, усовершенствование которых позволило совместить функции нормальной эксплуатации, а при появлении аварийного сигнала — автоматически переключиться на выполнение функций по подавлению возникшей аварии.

Согласно выполненным анализам безопасности для АЭС с РУ проекта В-320, определяющий вклад в частоту плавления активной зоны вносят события с полным обесточиванием АЭС. Подобная авария произошла на АЭС «Фукусима-1» в Японии в результате землетрясения и последовавшего за ним цунами, что привело к полной потере электроснабжения АЭС и отказу систем охлаждения реактора с последующим разрушением активной зоны.

Для устранения данного дефицита безопасности, в проектах РУ нового поколения применены три новые пассивные СБ, отсутствующие в проекте РУ В-320, которые позволяют управлять аварийными ситуациями, связанными с полной потерей электроснабжения. Описание данных систем приведено далее.

В некоторых проектах зарубежных АЭС, например РWR-1240 (Convoy), особое внимание уделено надежности выполнения функции отвода тепла через второй контур в условиях полного обесточивания энергоблока, для чего электроснабжение насосов аварийной питательной воды резервировано малогабаритными автономными дизель-генераторами (ДГ). В Украине на энергоблоках №№ 1, 2 Ровенской АЭС (РУ ВВЭР-440/В-213) внедрена дополнительная система аварийной питательной воды (ДСАПВ), в которой также использованы насосные агрегаты с дизельным приводом [6].

Несмотря на малую вероятность запроектных аварий и аварий с тяжелым повреждением активной зоны, их также необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации АЭС. Подтверждением тому являются аварии, произошедшие на «Три Майл Айленд» и Чернобыльской АЭС, а также недавняя авария на АЭС «Фукусима-1». Поэтому наряду с внедрением новых пассивных систем безопасности эволюция проектов ВВЭР-1000 идет в направлении внедрения дополнительных систем удержания расплава топлива и радиоактивных продуктов внутри герметичной оболочки. В новых проектах ВВЭР-1000, таких как В-392, В-428, В-446, В-412 и В-466, по сравнению с проектами АЭС с РУ В-320, дополнительно разработаны и внедрены система подавления водорода, устройство для улавливания расплава активной зоны (ловушка кориума),

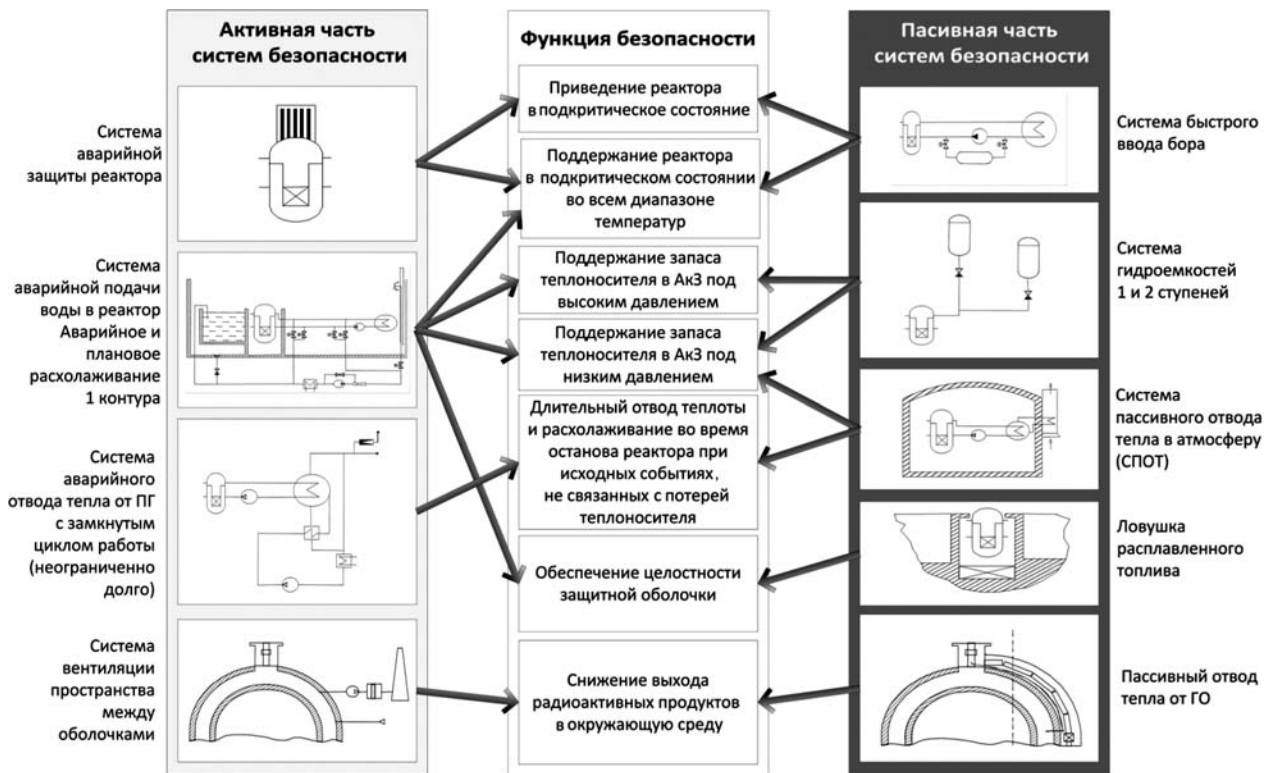


Рис. 2. Функции систем безопасности РУ нового поколения

реализована двойная защитная оболочка здания реактора [5]. Кроме того, спринклерная система реализована с кратностью резервирования $4 \times 100\%$. В качестве одной из локализирующих систем в проекте АЭС с РУ В-428 изначально была предусмотрена система очистки аварийного выброса парогазовой смеси из оболочки на случай тяжелых аварий. Выполненный комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ позволил в дальнейшем отказаться от системы сброса давления из защитной оболочки при аварийных ситуациях, что стало возможным благодаря использованию устройства локализации расплава активной зоны, исключая взаимодействие расплава с бетоном и ограничивающего выход газов в защитную оболочку.

На рис. 2 схематично показано выполнение активными и пассивными СБ функций, необходимых для приведения РУ в безопасное состояние при возникновении любых исходных событий аварий.

Использование *пассивной системы быстрого ввода бора (СБВБ) в теплоноситель первого контура* в случае аварии с отказом срабатывания аварийной защиты реактора (режим АТWS) позволяет привести реактор в подкритическое состояние. Снижение мощности в этом случае осуществляется вследствие обратных связей по реактивности и ввода в активную зону реактора борного раствора от СБВБ как при работающих, так и при выбегающих ГЦН. Оборудование СБВБ установлено на каждой петле первого контура. Канал системы представляет собой контур байпасирования ГЦН, содержащий емкость раствора бора концентрацией 40 г/кг и трубопроводы с быстродействующей арматурой.

При авариях с потерей всех источников электроснабжения для расхолаживания РУ предусмотрена *система пассивного отвода тепла (СПОТ)*, которая позволяет неограниченно долго отводить остаточные тепловыделе-

ния и исключить повреждение активной зоны реактора. Каждый из четырех каналов СПОТ состоит из трех воздушных теплообменников, трубопроводов и арматуры. Пар, поступающий из ПГ, конденсируется в теплообменниках СПОТ, образующийся конденсат возвращается обратно в ПГ. СПОТ позволяет отводить тепло, эквивалентное 2 % номинальной мощности реактора. Проект системы предполагает четырехканальное исполнение по принципу резервирования $4 \times 33\%$. Это означает, что при четырех работающих контурах система выполняет свою функцию при одновременном суммарном отказе трех теплообменных модулей в разных циркуляционных петлях. В РУ В-392М и В-491 (ВВЭР-1200 на основе проекта АЭС-2006) конструкция СПОТ несколько отличается от применяемой в новых проектах ВВЭР-1000. Так, для РУ В-392М из четырех каналов СПОТ включает по два воздушных теплообменника, для РУ В-491 — по 18 теплообменников, охлаждаемых водой. При этом принцип резервирования аналогичный ($4 \times 33\%$).

Система гидроемкостей второй ступени (ГЕ-2) обеспечивает достаточный запас теплоносителя для дополнительного залива активной зоны при течах из первого контура в условиях полного обесточивания блока АЭС. Восемь емкостей ГЕ-2 по 120 м³ объединены попарно в четыре группы, которые соединены с трубопроводами гидроемкостей первой ступени. Система ГЕ-2 подает борный раствор в реактор при падении давления в первом контуре ниже 1,5 МПа после срабатывания ГЕ первой ступени.

Эффективность работы новых СБ подтверждена стендовыми испытаниями на заводах-изготовителях [4], при проведении которых выполнен ряд исследований для подтверждения функциональной работоспособности новых систем. К таким исследованиям по СБВБ относились:

исследование изменения концентрации борного раствора на выходе из баков системы при ее срабатывании;

Таблица 2. Системы безопасности проектов РУ с ВВЭР-1000

Наименование СБ	Проекты РУ						
	В-187	В-302	В-338	В-320	В-392	В-412/466	В-428
САОЗ высокого давления	3×100 %	3×100 %	3×100 %	3×100 %	—	4×100 %	4×100 %
САОЗ низкого давления	3×100 %	3×100 %	3×100 %	3×100 %	—	4×100 %	4×100 %
САОЗ высокого-низкого давления	—	—	—	—	392Б— 3×100 % 392М— 4×100 %	—	—
Система аварийного ввода бора	+	+	+	+	-	+	+
Система аварийного газоудаления	+	+	+	+	+	+	+
Импульсно-предохранительные устройства компенсатора давления	3 пар	3 пар	3 пар	3 пар	3 пар/вода	3 пар/вода	3 пар/вода
Система быстрого ввода бора	—	—	—	—	4×25 %	4×25 %	4×25 %
Гидроемкости первой ступени	4×33 %	4×33 %	4×33 %	4×33 %	4×33 %	4×33 %	4×33 %
Гидроемкости второй ступени	—	—	—	—	4×25 %	4×25 %	4×25 %
Аварийный запас борного раствора высокой концентрации в САОЗ (40 г/кг)	1×150 м ³	1×150 м ³	1×150 м ³	3×15 м ³	—	—	—
Аварийный запас борного раствора низкой концентрации в САОЗ (16 г/кг)	3×585 м ³	3×585 м ³	3×750 м ³	1×630 м ³	1×500 м ³	1×500 м ³	2×1200 м ³
Система аварийной питательной воды	3×100 %	3×100 %	3×100 %	3×100 %	—	—	4×100 %
Объем воды в баках аварийной питательной воды	3×500м ³	3×500м ³	3×500м ³	3×500м ³	—	—	4×700м ³
Система аварийного расхолаживания парогенераторов	—	—	—	—	4×100 %	4×100 %	—
Система пассивного отвода тепла	—	—	—	—	4×33 %	4×33 %	—
Импульсно-предохранительные устройства ПГ	2×4, пар	2×4, пар	2×4, пар	2×4, пар	2×4, пар/вода	2×4, пар/вода	2×4, пар/вода
Быстродействующие запорно-отсечные клапаны на паропроводе	+	+	+	+	+	+	+
Обратные клапаны на паропроводах	+	+	+	+	-	-	-
Электроприводные задвижки на паропроводах	+	+	+	+	+	+	+
Быстродействующая редукционная установка для сброса пара в атмосферу	1 на п/п пар	1 на п/п пар	1 на п/п пар	1 на п/п пар	4 на ГПК пар/вода	4 на ГПК пар/вода	1 на п/п пар
Спринклерная система	3×100 %	3×100 %	3×100 %	3×100 %	совмещена с САОЗ НД	4×100 %, совмещена с САОЗ НД	4×100 %, совмещена с САОЗ НД
Герметичная оболочка	одинарная	одинарная	одинарная	одинарная	392Б—одинарная 392М—двойная	двойная	двойная
пассивная система удаления водорода	—	—	—	—	392Б/- 392М/+	+	+
система удержания и охлаждения рас-плава активной зоны	—	—	—	—	392Б/- 392М/+	+	+
пассивная система удаления водорода	—	—	—	—	392Б/- 392М/+	+	+

исследования полей температур и концентраций борного раствора на входе в активную зону при срабатывании; обоснование работы СБВБ в режимах ожидания и исключения ее ложных срабатываний.

По СПОТ это следующие исследования: определение тепловой мощности природных теплообменных модулей в зависимости от параметров внутренней и внешней среды;

исследование устойчивости циркуляции в теплообменных трубках и исследование по обоснованию ресурса работы теплообменников;

исследование влияния неконденсируемых газов на теплообмен и способов удаления этих газов.

По системе GE-2 были выполнены исследования процессов в системе при ее подключении к первому контуру и исследования расходных характеристик системы при проектных авариях, а также комплексные исследования процессов в РУ при одновременной работе СПОТ и GE-2.

Табл. 2 показывает преимущество РУ нового поколения над энергоблоками ВВЭР-1000 «малой» и «большой» серий в части повышения их безопасности, которое подтверждается многоканальностью и увеличением кратности резервирования активных СБ, расширением защитных функций предохранительных устройств, увеличением объемов баков аварийного запаса борного раствора и питательной воды, а также внедрением новых СБ, использующих пассивные принципы действия.

Оценку повышения безопасности РУ с ВВЭР-1000 нового поколения можно дать, сопоставив результаты расчета количественных показателей, полученных с помощью вероятностного анализа безопасности, таких как средние по проектам ЧПА3 и ЧПАВ. В табл. 3 представлены оценочные значения данных величин для РУ «большой» серии и проектов нового поколения [8]–[12].

Таблица 3. Количественные показатели безопасности

Показатель	В-320	В-392	В-412	В-428
ЧПА3, 1/год	$8,3 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{-7}$	$2,38 \times 10^{-7}$	$3,3 \times 10^{-6}$
ЧПАВ, 1/год	9×10^{-6}	$< 10^{-8}$	$< 10^{-8}$	$6,3 \times 10^{-8}$

Из всех известных проектов РУ с легководными реакторами наименьшую ЧПА3 имеет проект Westinghouse Electric «AP-1000»: $1,7 \times 10^{-7}$ на реактор в год [11]. Такой уровень безопасности достигается максимальным упрощением схемы РУ и применением большого числа пассивных СБ. Таким образом, РУ ВВЭР-1000 нового поколения соответствуют уровню безопасности современных мировых разработок.

Подводя итог выполненного обзора РУ ВВЭР-1000, можно сделать вывод, что с точки зрения оптимальности сочетания активных и пассивных СБ и количественных показателей безопасности наиболее сбалансированными и безопасными проектами ВВЭР-1000 нового поколения являются РУ В-412 и В-466, разработанные для АЭС «Кудамкулан», Индия, и АЭС «Белене», Болгария.

Выводы

Результаты сравнения характеристик различных модификаций РУ с ВВЭР-1000 в процессе их эволюции дают представление о преимуществах реакторов нового поколения перед старыми разработками, прежде всего в уровне безопасности, в том числе и перед РУ серийного проекта В-320, на основе которого были сооружены и в настоящее время эксплуатируются большинство блоков с ВВЭР-1000. Можно утверждать, что единственно правильный путь повышения безопасности энергоблоков АЭС — это разработка и внедрение СБ, основанных на пассивном принципе действия, и, кроме того, усовершенствование активных СБ.

В настоящее время работы по созданию усовершенствованных проектов с ВВЭР продолжаются. Последние инженерные решения проектов РУ с ВВЭР-1000 с повышенными характеристиками безопасности легли в основу проекта следующего поколения — АЭС-2006. Эти решения уже внедрены на сооружаемых в настоящее время энергоблоках НВАЭС-2 и ЛАЭС-2; планируется использование этого проекта при строительстве АЭС в Белоруссии и Турции.

Дальнейшее изучение ведущих современных мировых разработок ядерных установок следует сосредоточить на анализе и сравнении проектов EPR, APWR, ACR, AP1000, БН, ВВЭР следующих поколений (АЭС-2006, ВВЭР-640, ВВЭР на сверхкритическом давлении (ВВЭР-СКД)).

Приведенные результаты сравнения характеристик проектов ВВЭР-1000 могут быть использованы при принятии решения о выборе проектов при строительстве новых энергоблоков в Украине в рамках реализации Энергетической стратегии [1].

Список литературы

1. Энергетична стратегія України на період до 2030 року. — Схвалено розпорядж. КМУ від 15.03.2006 № 145-р.
2. Никитенко, М. П. Технология ВВЭР. Состояние. Проблемы. Задачи / ОКБ «Гидропресс» // Доклад на III Междунар. конф. «АЭС: проектирование, строительство, эксплуатация». 01.12.2009. Москва.
3. Резепов, В. К. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций / В. К. Резепов, В. П. Денисов, Н. А. Кирилюк и др. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. — 333 с.
4. Логвинов, С. А. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР / С. А. Логвинов, Ю. А. Безруков, Ю. Г. Драгунов. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. — 255 с.
5. Денисов, В. П. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций / В. П. Денисов, Ю. Г. Драгунов. — М.: ИздАТ, 2002. — 480 с.
6. Обоснование компенсирующих мероприятий при невозможности применения концепции «зона без разрыва», мероприятие 2.4.2 КПБ КМУ: Итоговый отчет по обоснованию компенсирующих мероприятий при невозможности применения концепции «зона без разрыва». ЕР06-2008.120.ОД01. Ровенская АЭС. Энергоблок № 1. 2008.
7. Технично-економічне обґрунтування спорудження енергоблоків № 3,4 ХАЭС. — Т. 7: Основні технологічні рішення. — Ч. 1: Технологічна частина. 43–814.203.004.ОЭ.07.01. — К., 2009.
8. Отчет по анализу безопасности. Заключительный отчет по вероятностному анализу безопасности первого уровня для внутренних исходных событий энергоблока № 5 ОП ЗАЭС. 21.5.59. ОБ.04. Запорожская АЭС. Энергоблок № 5. — 2005.
9. Отчет по анализу безопасности. Вероятностный анализ безопасности первого уровня для работы энергоблока № 5 ОП ЗАЭС на пониженной мощности и в состоянии останова. Итоговый отчет. 21.5.59.ОБ.04.4. Запорожская АЭС. Энергоблок № 5. — 2008.
10. Предварительный отчет по обоснованию безопасности энергоблоков № 5, 6 Балаковской АЭС. — Гл. 1. 210015.0000002.00506.510-КТ.0701.01. — М.: Атомэнергопроект, 2004. — 360 с.
11. Хмельницька АЭС. Энергоблок № 3. Етап 2. Технично-економічний аналіз по вибору типу енергоблока для ХАЭС-3. 43–375.202.002.ТЭ.00. — К.: Киев. науч.-исслед. и проект.-констр. ин-т «Энергопроект», 2005. — 111 с.
12. Свириденко, И. И. Оценка влияния автономной термосифонной СПОТ на повышение безопасности РУ АЭС с ВВЭР-1000 // И. И. Свириденко, А. Ю. Проходцев // 36. науч. пр. СНУ-ЯЕтаП. — Севастополь, 2009. — Вып. 2. — С. 44–52.

Надійшла до редакції 11.05.2011.