



ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ

№ 4-5

2011

СЕРИЯ: АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

АЭС ФУКУСИМА

В свете последних событий на АЭС Фукусима общественность стран, реализующих ядерно-энергетические программы, волнует вопрос: достаточно ли надежны эксплуатируемые и строящиеся на их территориях реакторы.

Любой вид человеческой деятельности сопряжен с возможными рисками. Абсолютной безопасности нет, и ядерная энергетика не является исключением: несмотря на все предосторожности, она также подвержена риску катастроф из-за вероятности пусть даже чрезвычайно редких и маловероятных, но возможных событий, влекущих тяжелые последствия. Маловероятные события (особенно такие, каких еще никогда не было) предсказать очень трудно, затраты на защиту от их последствий могут быть огромными. Построить реактор, способный выстоять при любых условиях, – непозволительная роскошь; итоговая конструкция всегда является результатом ряда компромиссов между множеством ограничений, налагаемых физикой, затратами и требованиями защиты от возможных аварий. Развитие атомной энергетике всегда шло в направлении поиска оптимума безопасности и экономичности, но приоритет оставался за критериями безопасности.

Опыт мировой ядерной энергетике свидетельствует об ее экологических и экономических преимуществах. Однако вероятность серьезных аварий, также, к сожалению, подтвержденных практикой, показывает, что ядерная энергетика будет иметь будущее в качестве одной из основных составляющих энергообеспечения человечества XXI века только при условии постоянной демонстрации ее безопасности.

Безопасность в ядерной энергетике – сложная, многогранная, общественно-значимая категория, представляющая собой совокупность технических, экономических, моральных, нравственных, правовых характеристик. Это в очередной раз было подтверждено событиями на АЭС Фукусима, где в результате беспрецедентного природного воздействия и ряда субъективных факторов произошла ядерная авария с тяжелыми последствиями – расплавлением топлива и выходом радиоактивных продуктов деления в окружающую среду.

Исходные аварийные события

11 марта вблизи северо-восточного побережья Японии произошло землетрясение силой 9 магнитуд по шкале Рихтера, эпицентр которого находился в Тихом океане на расстоянии свыше 100 километров от береговой линии. Землетрясение было редкой формы двойной сложности и длилось около трех минут. В пострадавшей местности на тот момент на 4-х атомных электростанциях работали или находились в состоянии планового останова 11 реакторных блоков. В работе находились:

- блоки 1-3 на АЭС Фукусима-I;
- блоки 1-4 на АЭС Фукусима-II;
- блоки 1-3 на АЭС Онагава;

один блок АЭС Токаи.

Блоки 4,5,6 АЭС Фукусима-I на момент землетрясения находились в состоянии планового останова для проведения технического обслуживания и перегрузки ядерного топлива, причем на блоке 4 активная зона была выгружена в бассейн выдержки, на блоках 5-6 топливо находилось в активных зонах, активная зона блока 3 была загружена МОХ-топливом.

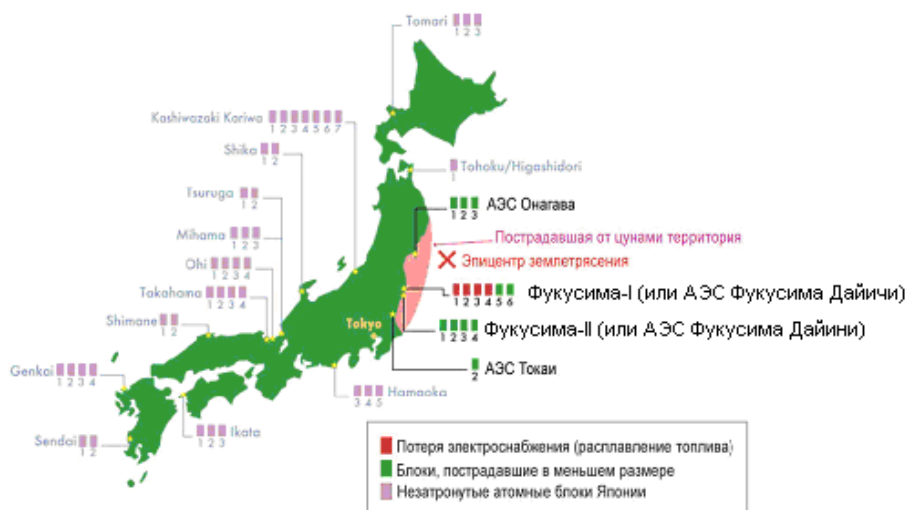


Рисунок 1 – АЭС Японии (электростанции Фукусима-I и Фукусима-II расположены на береговой линии в 11-и км друг от друга).

В момент воздействия землетрясения по сигналам от сейсмодатчиков произошла автоматическая остановка всех работающих энергоблоков путем срабатывания систем аварийной защиты реакторов, реакторы были переведены в подкритическое состояние.

Землетрясение вызвало потерю нормального энергоснабжения из-за разрушения линий электропередач. После этого, как и предусмотрено проектами АЭС, включились дизель-генераторы системы аварийного электроснабжения, обеспечившие работу систем расхолаживания активных зон и приреакторных бассейнов выдержки с отработавшим топливом. Обрушившееся на берег вслед за землетрясением цунами обусловило ряд проблем в работе охлаждающих систем на всех АЭС; однако к катастрофическим последствиям оно привело только на нескольких энергоблоках Фукусимы-I.

Волна цунами вызвала на Фукусиме-I затопление всей производственной площадки. Высота волны превышала 10 м (проектный уровень высоты волны цунами, на которую была рассчитана АЭС Фукусима-I, равнялся ~ 6 м). Были затоплены и дизель-генераторы, расположенные на цокольных этажах машзалов; электроснабжение мощных потребителей, участвовавших в расхолаживании, прекратилось. В проектах АЭС, разработанных в середине 60-х годов, не были предусмотрены не требующие электроэнергии пассивные системы аварийного охлаждения. Все элементы подсистем аварийного охлаждения на этих АЭС требуют определенного количества электроэнергии для работы клапанов, насосов, задвижек.

Конструктивно-технологические особенности энергоблоков АЭС Фукусима-I

Шесть ядерных реакторов станции — кипящие реакторы корпусного типа (BWR), построенные американской компанией «Дженерал электрик» с участием японских компаний Hitachi, Toshiba и введенные в эксплуатацию в 1971-1979 гг. Первый блок имел мощность 460 МВт, блоки 2-5 – 784 МВт каждый и 6-ой блок – 1100 МВт. Проект реакторной установки Mark-1 для станции разработан также компанией «Дженерал Электрик». Станция Фукусима-I принадлежит японской корпорации ТЕРСО – Tokyo Electric Power Corporation.

Особенностью энергоблоков с кипящим реактором является отсутствие парогенераторов, относительно компактные размеры зданий реакторных установок, одноконтурная схема движения теплоносителя. Пар производится непосредственно в активной зоне, сепарация пара с отделением влаги происходит в объеме корпуса реактора.

Сухой насыщенный пар по паропроводам подается на турбогенератор и к другим потребителям паротурбинной установки, затем отработанный пар поступает в конденсатор и т. д.

На рисунке 2 представлены: общий вид реакторного отделения энергоблока типа Mark-1 (а) и схема циркуляции теплоносителя (б).

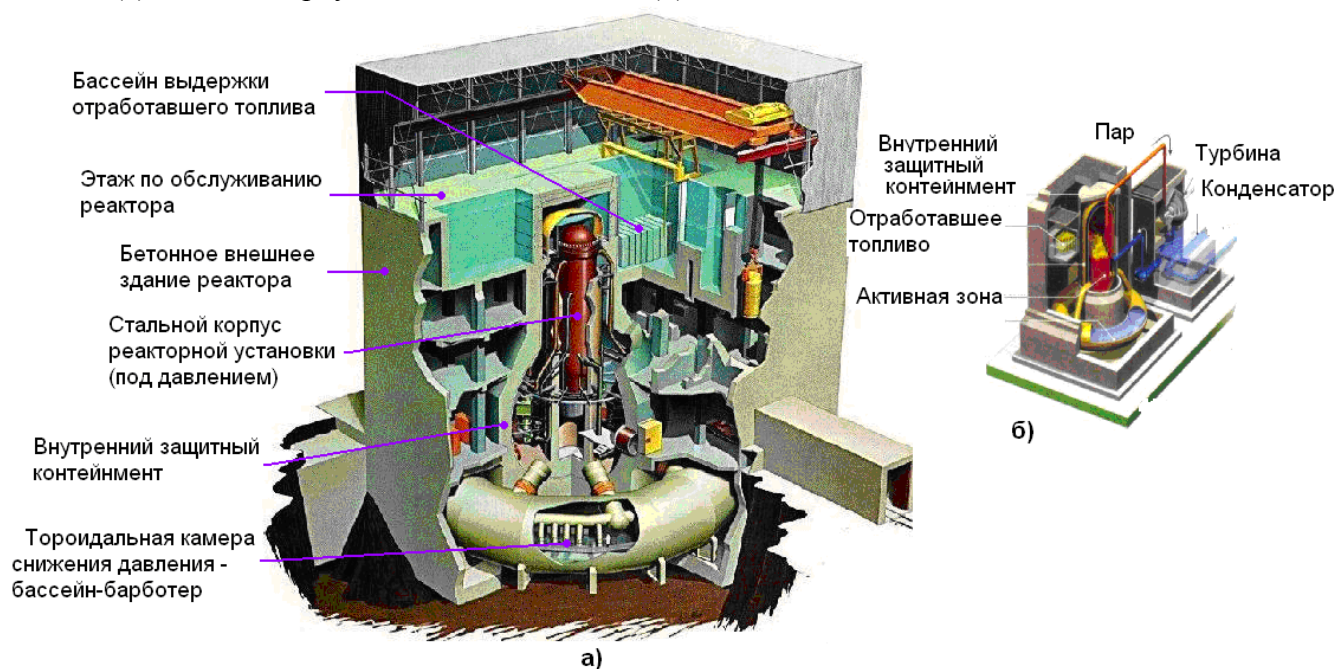


Рисунок 2 – Общий вид реакторного отделения энергоблока типа Mark-1 (а) и схема циркуляции теплоносителя (б)

В реакторной установке BWR Mark-1 первичный внутренний защитный корпус реактора (первичный контеймент) включает в себя свободно стоящий огромный пузыреобразный сосуд (сухой бокс контеймента) со стальной оболочкой в 30 мм, усиленной армированным бетоном. В его нижней части он соединен с кольцом тороидальной формы (водяной бокс контеймента/камера конденсации), которое служит как бассейн-барботер для гашения избыточного давления в контейменте и фильтрации радиоактивных выбросов. Соединение осуществляется посредством воздухоотводящих каналов и клапанов, которые при повышении давления в первичном контейменте выбрасывают газовые выхлопы под водой бассейна-барботера. Первичный контеймент содержит в себе металлический корпус реакторной установки высокого давления.

Приреакторный бассейн выдержки отработавшего ядерного топлива расположен вне контеймента внутри защитного бетонного здания реактора, которое является вторичной защитной оболочкой.

Развитие аварии

Смоделированное специалистами развитие аварии, в соответствии с поступающей со станции информацией, в общем виде выглядело следующим образом.

После затопления волной цунами дизель-генераторов энергоснабжение всех систем АЭС прекратилось. В проектах АЭС с реакторами BWR в системе аварийного охлаждения дополнительно к насосам с электроприводом предусмотрены насосы с турбоприводом, которые снабжаются паром, генерируемым в реакторе за счет остаточных тепловыделений активной зоны после его остановки. Насосы с турбоприводом могут подавать воду в реактор до тех пор, пока есть давление в реакторе, что обеспечивает меньшую зависимость выполнения функций аварийного охлаждения активной зоны от дизель-генераторов. Для работы насосов с турбоприводом кроме генерации пара в реакторе тоже требуется электропитание соответствующих управляющих систем и регуляторов (клапанов).

На Фукусиме-1 электропитание насосов с турбоприводом в течение нескольких часов после отказа дизель-генераторов производилась от имеющихся на станции аккумуляторных

батарей, что обеспечило создание некоторого запаса времени для доставки аккумуляторных батарей и портативных генераторов с других АЭС. Доставленные аккумуляторы еще на непродолжительное время обеспечили аварийное энергоснабжение, генераторы же подключить не удалось из-за высокого уровня воды на площадке. Подача воды в реакторы от насосов с турбоприводом с течением времени прекратилась из-за ограниченного запаса воды при работе по разомкнутому циклу или истощения емкостей батарей.

После этого ситуация на аварийных блоках АЭС Фукусима-I перешла в состояние запроектной аварии, но для такого сценария развития событий проектом не были предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие отвод остаточного тепловыделения от топлива в реакторах и бассейнах выдержки.

Прекращение охлаждения активной зоны привело к усилению парообразования и росту давления в реакторе, сбросу пара через предохранительные клапаны в объем контейнента и к снижению уровня воды в активной зоне. Это, в свою очередь, обусловило оголение верхней части топливных элементов, рост их температуры, возникновение пароциркониевой реакции (окисление циркония оболочек тепловыделяющих элементов с выделением свободного водорода) с последующим частичным повреждением топливных сборок. Радиоактивные продукты деления ядерного топлива вместе с паром и водородом через предохранительные (сбросные) клапаны выбрасывались в объем контейнента. Это привело к повышению в нем давления до предельно допустимого и к необходимости сброса среды из объема контейнента в объем внешней оболочки, не предназначенной для удержания избыточного давления. Отсутствие охлаждения отработавшего топлива в бассейнах выдержки также привело к выкипанию воды, пароциркониевой реакции с выделением водорода и к повреждению топлива.

Смесь водорода с кислородом в определенной концентрации взрывоопасна («гремучая смесь»). Взрывы водорода привели (12, 15, 14 марта) к разрушению верхних частей зданий реакторных отделений соответственно энергоблоков №№ 1, 2, 3. Не удалось избежать скопления водорода, а затем и взрыва (15 марта) в верхней части здания энергоблока №4. Разуплотнение зданий в результате взрывов привело к выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду и создало сложную радиационную обстановку на площадке АЭС и за ее пределами.

Чтобы остановить дальнейший разогрев топлива из-за отсутствия охлаждения в активных зонах (блоки 1, 2, 3) и бассейнах выдержки (блоки 1, 2, 3, 4), сотрудники компании ТЕРСО приняли решение закачивать морскую воду через трубопровод системы пожаротушения, используя насосы, привезенные на площадку станции.

О состоянии двух централизованных хранилищ отработавшего ядерного топлива

На АЭС Фукусима-I имеются два централизованных хранилища отработавшего ядерного топлива.

Централизованное мокрое хранилище отработавшего топлива находится поблизости от блока 4 (в западном направлении в сторону материка). Этот бассейн содержит около 60% отработавшего топлива со всех блоков. Циркуляция охлаждения в этом бассейне тоже прекратилась с прекращением подачи электроэнергии, и температура воды возросла до ~ +70°C к моменту, когда электроснабжение и охлаждение были восстановлены.

Для отработавшего топлива АЭС Фукусима-I компанией ТЕРСО было разработано также сухое контейнерное хранилище. Контейнеры с топливом расположены в сейсмостойком здании хранилища горизонтально. Хранилище введено в эксплуатацию в 1995 году, планируемый срок эксплуатации хранилища – 40 лет. К концу 1997 в хранилище были загружены 9 контейнеров (5 контейнеров по 52 и 4 контейнера по 37 отработавших тепловыделяющих сборок, всего около 73 т урана). Хранилище рассчитано на хранение тепловыделяющих сборок с первоначальным обогащением 3,7% и выгоранием 40 ГВт·сут/тU.

Централизованные хранилища отработавшего ядерного топлива при аварии не пострадали.

На рисунке 3 представлено сухое контейнерное хранилище отработавшего ядерного топлива ТЕРСО на АЭС Фукусима-I.

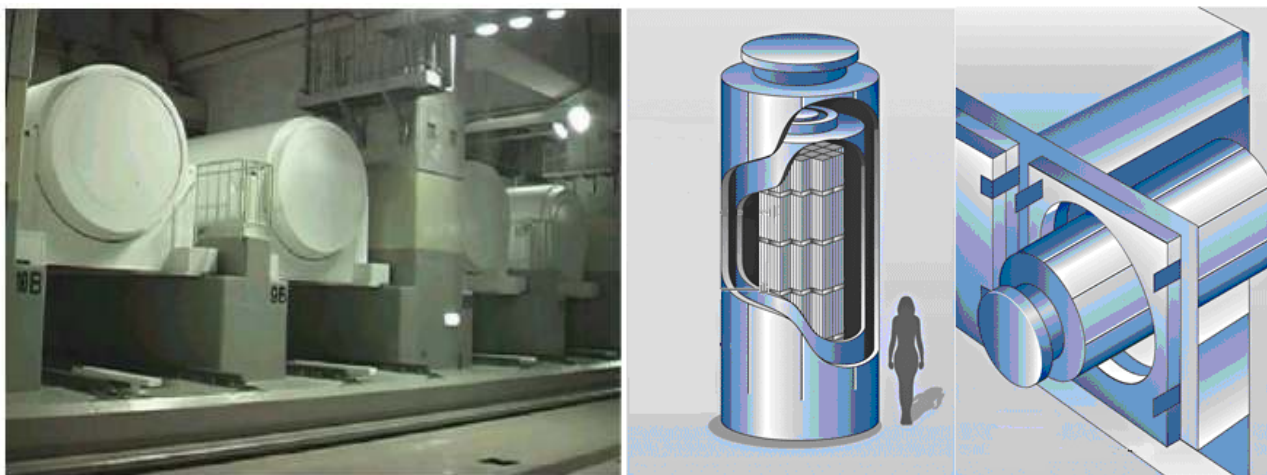


Рисунок 3 – Сухое контейнерное хранилище отработавшего ядерного топлива ТЕРСО (фрагмент хранилища, контейнер, бетонная ячейка с контейнером)

Анализ событий на АЭС Фукусима-I

Площадка АЭС находится в районе высокой сейсмичности и цунамиопасности.

Первопричиной аварии явилась комбинация крайне маловероятных экстремальных по своим масштабам природных воздействий. Дальнейшая последовательность аварийных событий обусловлена субъективными факторами.

Уровень устойчивости АЭС к землетрясениям оценивается максимальными значениями колебаний грунта на площадке АЭС, при которых сохраняется возможность эксплуатации станции в одном из штатных режимов, – так называемое максимальное проектное ускорение движения грунта, выраженное в единицах g (ускорение свободного падения). Энергоблоки Фукусимы-I рассчитаны на максимальное значение горизонтального ускорения на поверхности площадки в диапазоне $0,42-0,52 g$ и на максимальную высоту волны цунами около 6 м. Во время землетрясения 11 марта в фундаментах блоков Фукусимы-I зафиксировано максимальное значение колебаний грунта, превысившее границу чувствительности к землетрясениям этих реакторов. Станция нагрузки от произошедшего землетрясения выдержала без повреждений. Однако расчетный уровень цунами был превышен вдвое, что привело к затоплению площадки и явилось одной из основных причин катастрофы.

Цунами, также как и потеря электроснабжения АЭС от энергосистемы, являются вторичными, зависимыми от землетрясения событиями. Поэтому в проектах АЭС должны рассматриваться комплексные воздействия, включающие воздействия от первичного события и всех зависимых от него вторичных событий природного и техногенного происхождения.

Основной субъективный фактор развития запроектной аварии – конструктивно-технологические характеристики проектов энергоблоков Фукусимы-I, характерные для ядерных установок старого поколения, разработанных в 60-х годах прошлого столетия:

отсутствие необходимых технических средств и соответствующих руководств для действий персонала по предотвращению тяжелых аварий с повреждением ядерного топлива в активной зоне и в бассейне выдержки на случай возникновения полного обесточивания или полного отказа активных систем аварийного отвода тепла;

отсутствие, в первую очередь, пассивных систем безопасности, выполняющих функции подачи охлаждающей воды для аварийного отвода тепла от отработавшего топлива в активной зоне и в бассейне выдержки, а также пассивной системы (рекомбинаторов) удаления водорода из защитных оболочек;

незначительные запасы воды в активной зоне, что является особенностью кипящих реакторов BWR;

расположение распределительных устройств электропитания в подвальных помещениях блоков;

наличие только механической системы регулирования реактивности – органов СУЗ, и их расположение в нижней части корпуса реактора и др.

По мнению специалистов ситуация на Фукусиме-I усугубилась еще и недостатками в сфере ядерного регулирования и надзора за безопасностью ядерных объектов, определенной замкнутостью японских атомщиков.

Из всего произошедшего на АЭС Фукусима-I сделаны предварительные выводы:

- *восстановление подачи воды для охлаждения ядерного топлива в течение первых часов после полной потери энергоснабжения является ключевым критерием успеха;*

- *на каждом энергоблоке должен быть организован запас неповреждаемых при стихийных бедствиях технических средств, обеспечивающих энерго- и водоснабжение для охлаждения топлива;*

- *персонал должен быть нацелен на незамедлительные действия по предупреждению тяжелых аварий с использованием любой внешней помощи.*

Противоаварийные действия

Действия, которые предпринимались для ликвидации аварии:

залив реакторов, защитных оболочек и бассейнов морской водой на блоках 1-4 (что означало «смерть» реакторов – коррозия, радиолиз, отложения, сдвиг температуры начала пароциркониевой реакции);

организация отверстий в крышах блоков 2, 5, 6;

восстановление двух дизель-генераторов на блоках 5, 6;

подключение блоков 1-4 к внешнему электроснабжению через проложенный кабель;

откачка радиоактивной воды из помещений с оборудованием;

объявление 30-и километровой зоны эвакуации;

возобновление подачи пресной воды в реакторы блоков 1-3 и др.

Радиоактивное облучение

Непосредственно от ядерной аварии не погибло ни одного человека. Два служащих ТЕРСО на АЭС Фукусима-I и один на АЭС Фукусима-II погибли в результате прямого развития землетрясения и цунами.

На начальном этапе аварии не было зафиксировано ни одного случая смерти или тяжелых случаев проявления лучевой болезни. Дозы, превышающие 100 мЗв, получили более 100 рабочих, восемь из них – дозы, превышающие 250 мЗв. В связи с экстренностью ситуации предельно допустимая доза для аварийных рабочих была поднята регулирующими органами Японии 17 марта со 100 мЗв до 250 мЗв (впоследствии предельно допустимую дозу вернули к прежнему значению 100 мЗв).

Меры по эвакуации местного населения и ограничению потребления местных продуктов позволили контролировать уровень облучения гражданского населения в пределах допустимой нормы.

Оценка ядерного происшествия на Фукусиме-I по международной шкале INES

На данный момент этой аварии присвоен 7-й, самый высокий, уровень по международной шкале оценки ядерных происшествий INES.

Будущее АЭС Фукусима-I

20-го мая совет директоров компании ТЕРСО подтвердил, что блоки 1-4 будут выведены из эксплуатации. Они не подлежат восстановлению. Все предпринимаемые действия будут направлены на недопущение дальнейшей деградации топлива и приостановление утечек радиоактивности из аварийных блоков. Например, начата работа по укрытию реакторного здания блока №1 специальной полиэфировой пленкой.

Планы строительства 7-го и 8-го блоков будут отменены. Будущее блоков 5, 6 станции, также, как и четырех блоков на Фукусиме-II, пока неясно, хотя компания заявила, что при рассмотрении вопроса об их дальнейшей эксплуатации будет учтено мнение местного населения.

Защищенность АЭС с новыми реакторами ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 в случае чрезвычайных событий природного и техногенного характера

Специалистами российской атомной отрасли была оперативно выполнена компетентная оценка роли в развитии событий на АЭС Фукусима экстремальных природных воздействий, технико-эксплуатационных характеристик реакторов, человеческого фактора. Были реализованы широкомасштабные программы по проверке действующих российских АЭС (экстренные детальные «стресс-тесты», переоценка аварийной готовности), выполнен анализ проектных основ энергоблоков нового поколения с реакторами ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и др.

Россия извлекла уроки из чернобыльской катастрофы. В 1986-1987 гг. были разработаны меры безопасности, являющиеся в данный момент самыми жесткими в мире. Строящиеся и проектируемые российские атомные станции отвечают не только действующим нормам безопасности, но и повышенным требованиям, которые, очевидно, появятся после аварии на АЭС Фукусима-I.

Принятые в проектах этих АЭС решения по обеспечению безопасности позволяют достичь уровня «практической» безопасности. Уровень «практической» безопасности характеризуется вероятностью превышения установленных для проектных аварий показателей радиационного воздействия на население и окружающую среду величиной $3 \cdot 10^{-8}$ за один год эксплуатации одного энергоблока, что эквивалентно значением вероятности природных катаклизмов. При проектировании были выполнены требования действующих в России нормативных документов по безопасности, рекомендации МАГАТЭ, EUR и других международных организаций.

Концепция безопасности проектов АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения основывается на применении детерминистских (инженерных) принципов современной концепции глубоко эшелонированной защиты и вероятностных анализов безопасности для количественной оценки достигаемого уровня безопасности. При формировании концепции безопасности учитывались недостатки проектов действующих АЭС с реакторами ВВЭР-1000 предыдущего поколения.

Основные принципы концепции безопасности:

минимизация влияния максимальных расчетных уровней внешних воздействий природного и техногенного происхождения при выборе площадки для АЭС;

достаточные запасы прочности для предотвращения повреждения важных для безопасности зданий, строительных конструкций, сооружений, оборудования и элементов при различных внешних воздействиях и их сочетаниях;

применение принципа функционального и/или конструктивного разнообразия в системах, выполняющих каждую отдельную функцию безопасности. Применяются взаиморезервирующие одна другую системы безопасности «активного» и «пассивного» принципов действия, что обеспечивает защиту от отказов по общей причине и позволяет на несколько порядков повысить показатели надежности выполнения функций безопасности;

использование каналов активных систем безопасности для выполнения функций нормальной эксплуатации, что позволяет повысить уровень готовности систем безопасности, обеспечить дополнительную защиту от отказов по общей причине, исключить скрытые отказы;

расширенное применение пассивных систем безопасности, для функционирования которых не требуется подача электропитания, каких-либо сред и управляющих сигналов, а так же каких-либо действий оперативного персонала;

обеспечение защиты от ошибочных действий персонала за счет повышения уровня автоматического управления системами (исключение действий персонала) при возникновении проектных аварий, применения пассивных систем безопасности;

применение двойной защитной оболочки полного давления с пассивными системами (рекомбинаторами) удаления водорода, ловушки расплавленного ядерного топлива, обеспечивающих непревышение установленных значений предельного выброса при запроектных авариях с тяжелым повреждением активной зоны;

создание достаточных запасов времени для управления глубоко запроектными авариями для предотвращения тяжелых повреждений ядерного топлива.

Проектными решениями по безопасности для энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения обоснована защищенность российских АЭС от чрезвычайных ситуаций, аналогичных японским, и готовность к подобным сценариям на российских атомных станциях.



Работа по анализу информации, поступающей с АЭС Фукусима-1, продолжается. Одним из основных последствий аварии на Фукусиме явилось осознание всеми членами мирового ядерного сообщества необходимости серьезного переосмысления требований к безопасности в сторону их ужесточения. В ближайшее время МАГАТЭ проведет крупную конференцию по безопасности, где предполагается проанализировать технические аспекты аварии на Фукусиме, изучить ее уроки, разработать и наметить процессы совершенствования механизмов ядерной безопасности и систем реагирования на ядерные аварии.

Проблемы, высвеченные аварией на АЭС Фукусима-1, могут расстроить планы строительства некоторых новых реакторов, но необходимость борьбы с глобальным потеплением и все возрастающее энергопотребление дают основания полагать, что развитие атомной энергетики будет продолжаться.

Источники:

1. www.world-nuclear.org/fukushima
2. Материалы Форума-диалога «Атомная энергия, общество, безопасность», 19-20 апреля 2011 г., Санкт-Петербург
3. www.nucleartourist.com
4. www.sciam.ru
5. Калинин, В. И. Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов / В.И. Калинин, В.Г. Крицкий, А.И. Токаренко и др. – Санкт-Петербург, 2009. – 108 с.

Материал подготовили: Брылева В.А., Войтецкая Е.Ф., Касюк Д.М., Нарейко Л.М.

Адреса для контактов:

ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси, 220109, Минск, ул. академика А.К. Красина, 99
тел.: 299-47-61, 299-45-56, факс: 299-43-55, E-mail: <http://www.sosny.bas-net.by>

E-mail: valentina.bryliova@yandex.by

Для получения данного информационного бюллетеня просим подать заявку в электронном виде с указанием своего электронного адреса

©При перепечатке ссылка обязательна

По заказу Министерства энергетики Республики Беларусь