

Нормы безопасности МАГАТЭ

для защиты людей и охраны окружающей среды

Проектирование активных зон реакторов атомных электростанций

Руководство по безопасности
№ NS-G-1.12



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ
АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

АВСТРАЛИЯ	ЙЕМЕН	ПОРТУГАЛИЯ
АВСТРИЯ	КАЗАХСТАН	РЕСПУБЛИКА МОЛДОВА
АЗЕРБАЙДЖАН	КАМЕРУН	РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
АЛБАНИЯ	КАНАДА	РУМЫНИЯ
АЛЖИР	КАТАР	САЛЬВАДОР
АНГОЛА	КЕНИЯ	САУДОВСКАЯ АРАВИЯ
АРГЕНТИНА	КИПР	СЕЙШЕЛЬСКИЕ ОСТРОВА
АРМЕНИЯ	КИТАЙ	СВЯТЕЙШИЙ ПРЕСТОЛ
АФГАНИСТАН	КОЛУМБИЯ	СЕНЕГАЛ
Бангладеш	КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	СЕРБИЯ И ЧЕРНОГОРИЯ
БЕЛАРУСЬ	КОСТА-РИКА	СИНГАПУР
БЕЛЬГИЯ	КОТ-Д'ИВУАР	СИРИЙСКАЯ АРАБСКАЯ РЕСПУБЛИКА
БЕНИН	КУБА	СЛОВАКИЯ
БОЛГАРИЯ	КУВЕЙТ	СЛОВЕНИЯ
БОЛИВИЯ	КЫРГЫЗСТАН	СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО ВЕЛИКОБРИТАНИИ И СЕВЕРНОЙ ИРЛАНДИИ
БОСНИЯ И ГЕРЦЕГОВИНА	ЛАТВИЯ	СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ
БОТСВАНА	ЛИБЕРИЯ	СУДАН
БРАЗИЛИЯ	ЛИВАН	СЬЕРРА-ЛЕОНЕ
БУРКИНА-ФАСО	ЛИВИЙСКАЯ АРАБСКАЯ ДЖАМАХИРИЯ	ТАДЖИКИСТАН
БЫВШАЯ ЮГОСЛ. РЕСП. МАКЕДОНИЯ	ЛИТВА	ТАИЛАНД
ВЕНГРИЯ	ЛИХТЕНШТЕЙН	ТУНИС
ВЕНЕСУЭЛА	ЛЮКСЕМБУРГ	ТУРЦИЯ
ВЬЕТНАМ	МАВРИКИЙ	УГАНДА
ГАБОН	МАВРИТАНИЯ	УЗБЕКИСТАН
ГАИТИ	МАДАГАСКАР	УКРАИНА
ГАНА	МАЛАЙЗИЯ	УРУГВАЙ
ГВАТЕМАЛА	МАЛИ	ФИЛИППИНЫ
ГЕРМАНИЯ	МАЛЬТА	ФИНЛЯНДИЯ
ГОНДУРАС	МАРОККО	ФРАНЦИЯ
ГРЕЦИЯ	МАРШАЛЛОВЫ ОСТРОВА	ХОРВАТИЯ
ГРУЗИЯ	МЕКСИКА	ЦЕНТРАЛЬНОАФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ДАНИЯ	МОНАКО	ЧАД
ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА КОНГО	МОНГОЛИЯ	ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ДОМИНИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	МЬЯНМА	ЧИЛИ
ЕГИПЕТ	НАМИБИЯ	ШВЕЙЦАРИЯ
ЗАМБИЯ	НИГЕР	ШВЕЦИЯ
ЗИМБАБВЕ	НИГЕРИЯ	ШРИ-ЛАНКА
ИЗРАИЛЬ	НИДЕРЛАНДЫ	ЭКВАДОР
ИНДИЯ	НИКАРАГУА	ЭРИТРЕЯ
ИНДОНЕЗИЯ	НОВАЯ ЗЕЛАНДИЯ	ЭСТОНИЯ
ИОРДАНИЯ	НОРВЕГИЯ	ЭФИОПИЯ
ИРАК	НОРВЕГИЯ	ЮЖНАЯ АФРИКА
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСПУБЛИКА	ОБЪЕДИНЕННАЯ РЕСПУБЛИКА ТАНЗАНИЯ	ЯМАЙКА
ИРЛАНДИЯ	ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ	ЯПОНИЯ
ИСЛАНДИЯ	ПАКИСТАН	
ИСПАНИЯ	ПАНАМА	
ИТАЛИЯ	ПАРАГВАЙ	
	ПЕРУ	
	ПОЛЬША	

Устав Агентства был утвержден 23 октября 1956 года на Конференции по выработке Устава МАГАТЭ, которая состоялась в Центральных учреждениях Организации Объединенных Наций в Нью-Йорке. Устав вступил в силу 29 июля 1957 года. Центральные учреждения Агентства находятся в Вене. Главной целью Агентства является достижение «более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире».

Серия норм по безопасности, № NS-G-1.12

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Руководство по безопасности

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ВЕНА, 2006 ГОД

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

Все научные и технические публикации МАГАТЭ защищены в соответствии с положениями Всемирной конвенции об авторском праве в том виде, как она была принята в 1952 году (Берн) и пересмотрена в 1972 году (Париж). С тех пор авторские права были распространены Всемирной организацией интеллектуальной собственности (Женева) также на интеллектуальную собственность в электронной (на дискетах и компакт-дисках) и виртуальной (веб-сайты и веб-порталы) форме. Для полного или частичного использования текстов, содержащихся в печатных или электронных публикациях МАГАТЭ, должно быть получено разрешение, которое обычно является предметом соглашений о роялти. Предложения о некоммерческом воспроизведении и переводе приветствуются и будут рассматриваться в каждом отдельном случае. Вопросы следует направлять по эл. почте в Издательскую секцию МАГАТЭ по адресу sales.publications@iaea.org или по почте:

Группа продажи и рекламы, Издательская секция
Международное агентство по атомной энергии
Wagramer Strasse 5
P.O. Box 100
A-1400 Vienna
Austria
fax: +43 1 2600 29302
tel.: +43 1 2600 22417
<http://www.iaea.org/books>

© МАГАТЭ, 2006

Напечатано МАГАТЭ в Австрии
Март 2006

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ
АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

МАГАТЭ, ВЕНА, 2006
STI/PUB 1221
ISBN 92-0-403706-7
ISSN 1020-5845

ПРЕДИСЛОВИЕ

Мохамед ЭльБарадей
Генеральный директор

Устав МАГАТЭ уполномочивает Агентство устанавливать нормы безопасности для охраны здоровья и сведения к минимуму опасности для жизни и имущества – нормы, которые МАГАТЭ должно использовать в своей собственной работе и которые государства могут применять посредством их включения в свои регулирующие положения в области ядерной и радиационной безопасности. Всеобъемлющий комплект регулярно пересматриваемых норм безопасности наряду с помощью МАГАТЭ в их применении стал ключевым элементом глобального режима безопасности.

В середине 90-х годов было начато осуществление существенного пересмотра программы норм безопасности МАГАТЭ, была введена пересмотренная структура комитета по надзору и принят системный подход к обновлению всего свода норм. В результате этого новые нормы отвечают наивысшим требованиям и воплощают наилучшую практику в государствах-членах. С помощью Комиссии по нормам безопасности МАГАТЭ проводит работу с целью содействия глобальному признанию и использованию своих норм безопасности.

Однако нормы безопасности эффективны лишь тогда, когда они правильно применяются на практике. Широкий круг услуг МАГАТЭ в области безопасности - от вопросов инженерной безопасности, эксплуатационной безопасности, радиационной безопасности, безопасности перевозки и безопасности отходов до вопросов регулирования и культуры безопасности в организациях - содействует государствам-членам в применении этих норм и оценке их эффективности. Эти услуги в области безопасности позволяют обмениваться ценной информацией, и я по-прежнему призываю все государства-члены пользоваться ими.

Ответственность за регулирование ядерной и радиационной безопасности несут сами страны, и многие государства-члены приняли решение принять нормы безопасности МАГАТЭ в целях их использования в своих национальных регулирующих положениях. Для Договаривающихся сторон различных международных конвенций о безопасности нормы МАГАТЭ являются последовательным и надежным средством обеспечения эффективного выполнения обязательств в соответствии с конвенциями. Эти нормы также применяются проектировщиками, изготовителями оборудования и операторами во всем мире с целью повышения ядерной и радиационной безопасности в областях энергопроизводства, медицины, промышленности, сельского хозяйства, научных исследований и образования.

МАГАТЭ весьма серьезно относится к долговременной задаче, стоящей перед всеми пользователями и регулирующими органами, - обеспечить высокий уровень безопасности при использовании ядерных материалов и источников излучения во всем мире. Их дальнейшее использование на благо человечества должно осуществляться безопасным образом, и нормы безопасности МАГАТЭ предназначены для содействия достижению этой цели.

НОРМЫ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПОСРЕДСТВОМ МЕЖДУНАРОДНЫХ НОРМ

Хотя обеспечение безопасности является национальной ответственностью, международные нормы и подходы к обеспечению безопасности содействуют достижению общей согласованности, помогают обеспечивать уверенность в том, что ядерные и радиационные технологии используются безопасно, а также способствуют международному техническому сотрудничеству и торговле.

Нормы также обеспечивают поддержку государствам в выполнении их международных обязательств. Одно общее международное обязательство - это то, что государство не должно осуществлять деятельность, которая причиняет ущерб в другом государстве. Более конкретные обязательства, возложенные на договаривающиеся государства, изложены в международных конвенциях, касающихся безопасности. Согласованные на международном уровне нормы безопасности МАГАТЭ обеспечивают для государств основу подтверждения того, что они выполняют эти обязательства.

НОРМЫ МАГАТЭ

Нормы безопасности МАГАТЭ закреплены в Уставе МАГАТЭ, который уполномочивает Агентство устанавливать нормы безопасности для ядерных и радиационных установок и деятельности и обеспечивать применение этих норм.

Нормы безопасности отражают международный консенсус в отношении того, что составляет высокий уровень безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды.

Они выпускаются в Серии норм безопасности МАГАТЭ, состоящей из трех категорий:

Основы безопасности

- содержащие цели, концепции и принципы обеспечения защиты и безопасности и служащие основой для требований безопасности.

Требования безопасности

- устанавливающие требования, которые должны выполняться с целью обеспечения защиты людей и охраны окружающей среды в настоящее

время и в будущем. Эти требования, для выражения которых применяется формулировка “должен, должна, должно, должны”, определяются целями, концепциями и принципами, изложенными в Основах безопасности. Если они не выполняются, то должны быть приняты меры для достижения или восстановления требуемого уровня безопасности. В Требованиях безопасности используется язык нормативных документов, что позволяет включать их в национальные законы и регулирующие положения.

Руководства по безопасности

—предоставляющие рекомендации и руководящие материалы по соблюдению Требований безопасности. Рекомендации в Руководствах по безопасности формулируются с применением глагола “следует”. Рекомендуются принимать указанные в них меры или эквивалентные альтернативные меры. В Руководствах по безопасности представлена международная образцовая практика, и во все большей степени они отражают наилучшую практику с целью помочь пользователям, стремящимся достичь высоких уровней безопасности. Каждая публикация по Требованиям безопасности дополняется рядом Руководств по безопасности, которые могут использоваться при разработке национальных регулирующих руководств.

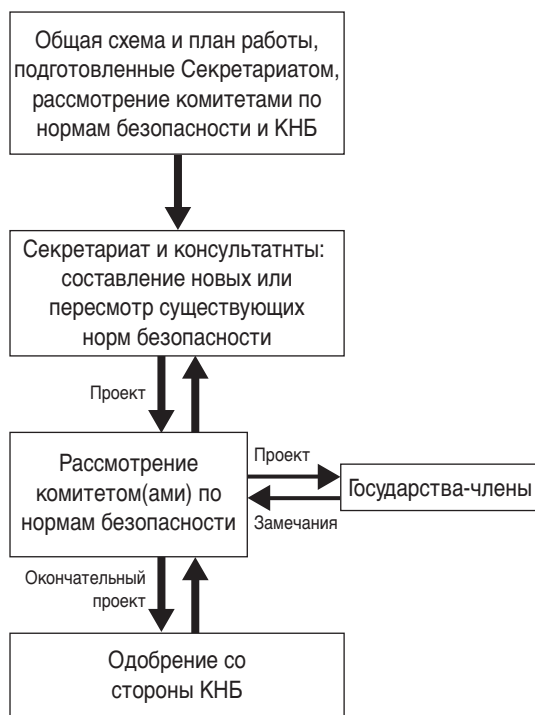
Нормы безопасности МАГАТЭ необходимо дополнять промышленными стандартами, и для достижения их полной эффективности они должны применяться в рамках соответствующих национальных регулирующих инфраструктур. МАГАТЭ выпускает широкий круг технических публикаций для помощи государствам в разработке этих государственных стандартов и в развитии инфраструктур.

ОСНОВНЫЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛИ НОРМ

Помимо регулирующих органов и правительственных учреждений, органов и организаций, эти нормы используют компетентные органы и эксплуатирующие организации в ядерной отрасли, организации, которые проектируют, изготавливают и применяют ядерное и радиационное технологическое оборудование, в том числе организации, эксплуатирующие установки различных типов, пользователи и другие лица, работающие с излучениями и радиоактивными материалами в сфере медицины, промышленности, сельского хозяйства, научных исследований и образования, а также инженеры, ученые, техники и другие специалисты. Эти нормы используются МАГАТЭ в проводимых им расследованиях безопасности и для разработки образовательных и учебных курсов.

ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ НОРМ

Подготовкой и рассмотрением норм безопасности занимаются Секретариат МАГАТЭ и четыре комитета по нормам безопасности в таких областях, как ядерная безопасность (НУССК), радиационная безопасность (РАССК), безопасность радиоактивных отходов (ВАССК) и безопасная перевозка радиоактивных материалов (ТРАНССК), и Комиссия по нормам безопасности (КНБ), которая осуществляет надзор за всей программой по нормам безопасности. Все государства - члены МАГАТЭ могут назначать экспертов в комитеты по нормам безопасности и представлять замечания по проектам норм. Члены КНБ назначаются Генеральным директором, и в его состав входят старшие правительственные должностные лица, несущие ответственность за установление национальных норм.



Процесс разработки новых норм безопасности или пересмотр существующих норм.

Одобренные Комиссией проекты Основ безопасности и Требований безопасности представляются Совету управляющих МАГАТЭ для утверждения их опубликования. Руководства по безопасности публикуются после утверждения Генеральным директором.

Благодаря этому процессу нормы отражают согласованное мнение государств - членов МАГАТЭ. При разработке норм принимаются во внимание выводы Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) и рекомендации международных экспертных органов, в частности, Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ). Некоторые нормы разрабатываются в сотрудничестве с другими органами системы Организации Объединенных Наций или другими специализированными учреждениями, включая Продовольственную и сельскохозяйственную организацию Объединенных Наций, Международную организацию труда, Агентство по ядерной энергии ОЭСР, Панамериканскую организацию здравоохранения и Всемирную организацию здравоохранения.

Нормы безопасности постоянно обновляются: через пять лет после публикации они вновь рассматриваются, с тем чтобы определить необходимость их пересмотра.

ПРИМЕНЕНИЕ И СФЕРА ДЕЙСТВИЯ НОРМ

Согласно Уставу МАГАТЭ нормы безопасности являются обязательными для МАГАТЭ в отношении его собственной работы и для государств в отношении операций, в которых МАГАТЭ оказывает помощь. Любое государство, желающее вступить в соглашение с МАГАТЭ, касающееся любой формы помощи Агентства, должно выполнять требования норм безопасности, которые относятся к деятельности, охватываемой соглашением.

Международные конвенции также содержат требования, аналогичные тем, которые имеются в нормах безопасности, и делают их обязательными для договаривающихся сторон. Основы безопасности использовались в качестве основы для разработки Конвенции о ядерной безопасности и Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. Требования безопасности по готовности и реагированию в случае ядерной или радиационной аварийной ситуации отражают обязательства, возлагаемые на государства в соответствии с Конвенцией об оперативном оповещении о ядерной аварии и Конвенцией о помощи в случае ядерной аварии или радиационной аварийной ситуации.

Нормы безопасности, включенные в национальное законодательство и регулирующие положения и дополненные международными конвенциями и

детальными национальными требованиями, устанавливают основу для защиты людей и охраны окружающей среды. Однако имеются также особые аспекты безопасности, которые необходимо оценивать по отдельности на национальном уровне. Например, многие нормы безопасности, особенно те из них, которые охватывают аспекты планирования или разработки мер по обеспечению безопасности, прежде всего предназначаются для применения к новым установкам и видам деятельности. Требования и рекомендации, изложенные в нормах безопасности МАГАТЭ, не могут полностью соблюдаться на некоторых установках, построенных в соответствии с принятыми ранее нормами. Вопрос о том, как нормы безопасности должны применяться на таких установках, решают сами государства.

ТОЛКОВАНИЕ ТЕКСТА

Формулировка “должен, должна, должно, должны” используется в нормах безопасности при установлении международного консенсуса в отношении требований, обязанностей и обязательств. Многие требования не адресованы конкретной стороне, вследствие чего соответствующая сторона или стороны должны отвечать за их выполнение. В рекомендациях используется формулировка “следует”, указывающая на международный консенсус в этом отношении и означающая, что для выполнения требований необходимо принимать рекомендуемые (или эквивалентные альтернативные) меры.

В английском варианте текста относящиеся к безопасности термины должны толковаться в соответствии с их определениями в глоссарии МАГАТЭ по безопасности (<http://www-ns.iaea.org/standards/safety-glossary.htm>); в других случаях слова используются с написанием и приданными им значениями, приведенными в последнем издании Краткого оксфордского словаря английского языка. В отношении Руководств по безопасности английский вариант текста является официальной версией.

История вопроса и контекст каждой нормы в Серии норм безопасности, а также их цель, сфера действия и структура объясняются в разделе 1, Введение, каждой публикации.

Материал, который нецелесообразно помещать в рамках основного текста (т.е. материал, который является вспомогательным или идет отдельно от основного текста, включается в поддержку формулировок основного текста или описывает методы расчетов, процедуры экспериментов или пределы и условия), может быть представлен в добавлениях или приложениях.

Добавление, если оно включено, рассматривается в качестве неотъемлемой части норм. Материал в добавлении имеет такой же статус, как и основной текст, и МАГАТЭ берет на себя авторство в отношении такого

материала. Приложения и сноски к основному тексту, если они включены, используются для предоставления практических примеров или дополнительной информации или пояснений. Приложение не является неотъемлемой частью основного текста. Материал в приложениях, опубликованный МАГАТЭ, не обязательно выпускается в качестве его авторского материала; в приложениях может быть представлен материал, опубликованный в нормах, имеющих другое авторство. Посторонний материал в приложениях по мере необходимости публикуется в виде выдержек и адаптируется, с тем чтобы в целом быть полезным.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ	1
	Общие положения (1.1–1.2)	1
	Цель (1.3)	1
	Область применения (1.4–1.7)	2
	Структура (1.8)	3
2.	ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С УЧЕТОМ АСПЕКТОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ	4
	Общие положения (2.1–2.10)	4
	Нейтронно-физическое проектирование (2.11–2.16)	7
	Термогидравлическое проектирование (2.17–2.19)	8
	Механическое проектирование (2.20–2.26)	9
	Аспекты проектирования активной зоны, связанные с классификацией безопасности (2.27–2.29)	10
3.	КОНКРЕТНЫЕ СВЯЗАННЫЕ С БЕЗОПАСНОСТЬЮ СООБРАЖЕНИЯ, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ	11
	Общие положения (3.1–3.2)	11
	Топливные элементы и сборки (3.3–3.24)	11
	Теплоноситель (3.25–3.30)	17
	Замедлитель (3.31–3.36)	19
	Характеристики реактивности и средства регулирования реактивности активной зоны (3.37–3.58)	21
	Системы останова реактора (3.59–3.80)	26
	Активная зона реактора и связанные с ней конструкции (3.81–3.93)	33
	Управление активной зоной (3.94–3.111)	36
	Система контроля активной зоны (3.112–3.124)	40
	Анализ безопасности (3.125–3.135)	43
4.	АТТЕСТАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ	46
	Общие положения (4.1)	46
	Аттестация оборудования (4.2–4.4)	46
	Условия проведения инспекций и испытаний (4.5–4.7)	47

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ (5.1–5.2)	47
ДОПОЛНЕНИЕ I: КОЭФФИЦИЕНТЫ РЕАКТИВНОСТИ	49
ДОПОЛНЕНИЕ II: ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ “ТОПЛИВНАЯ ТАБЛЕТКА-ОБОЛОЧКА”	51
ДОПОЛНЕНИЕ III: СООБРАЖЕНИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ	53
ДОПОЛНЕНИЕ IV: АКТИВНЫЕ ЗОНЫ С ГЛУБОКИМ ВЫГОРАНИЕМ ТОПЛИВА	56
ДОПОЛНЕНИЕ V: АКТИВНЫЕ ЗОНЫ СО СМЕШАННЫМ ОКСИДНЫМ ТОПЛИВОМ	59
СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	62
ГЛОССАРИЙ	65
СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ	67
ОРГАНЫ, УЧАСТВУЮЩИЕ В ОДОБРЕНИИ НОРМ БЕЗОПАСНОСТИ	69

1. ВВЕДЕНИЕ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящее руководство по безопасности было подготовлено в рамках программы МАГАТЭ по разработке норм безопасности для АЭС. Основные требования к проектированию систем безопасности АЭС содержатся в публикации по требованиям безопасности, Серия норм безопасности № NS-R-1: «Безопасность атомных электростанций: проектирование» [1], которую дополняет настоящий документ. В данном руководстве по безопасности приведены рекомендации относительно соблюдения требований к проектированию активной зоны реактора АЭС.

1.2. Настоящая публикация представляет собой пересмотренный варианты предыдущего руководства по безопасности, посвященного безопасности активной зоны реактора в проектах атомных электростанций и выпущенного в 1986 году в качестве документа Серии изданий по безопасности № 50-SG-D14, причем настоящее руководство по безопасности заменяет этот документ. В пересмотренном варианте учтены новые разработки в области проектирования активной зоны реактора, появившиеся за период после выпуска предыдущего руководства по безопасности, и в него включены рекомендации и руководящие материалы по общим и конкретным соображениям, касающимся проектирования.

ЦЕЛЬ

1.3. Цель настоящего руководства по безопасности состоит в том, чтобы представить рекомендации, касающиеся средств безопасности, для применения при проектировании активной зоны реактора АЭС. В публикации по требованиям безопасности «Безопасность атомных электростанций: проектирование» изложены общие требования безопасности, применяемые при проектировании. Настоящее руководство по безопасности содержит рекомендации и руководящие материалы по интерпретации и осуществлению этих требований. Следует отметить, что ядерная безопасность достигается как совокупный результат правильного проектирования, изготовления, строительства и эксплуатации. По вопросам эксплуатационных аспектов следует обращаться к публикации по требованиям безопасности «Безопасность атомных электростанций: эксплуатация» [2] и связанным с ней руководствам по безопасности.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.4. В документе “Безопасность атомных электростанций: проектирование” [1] говорится:

“Ожидается, что настоящая публикация будет использоваться, прежде всего, для наземных стационарных АЭС с водоохлаждаемыми реакторами, предназначенными для производства электроэнергии или для других теплоэнергетических применений (такое, как централизованное теплоснабжение или опреснение). Признается, что в случае реакторов других типов, включая инновационные разработки будущих систем, некоторые требования могут оказаться неприменимыми или потребовать принятия некоторого решения в отношении их толкования”.

1.5. В настоящем руководстве по безопасности рассмотрены нейтронно-физические, тепловые, гидравлические, механические, химические и связанные с облучением соображения, являющиеся важными для проектирования активной зоны ядерного энергетического реактора с учетом аспектов безопасности. В настоящем руководстве по безопасности рассмотрены также индивидуальные системы и элементы, составляющие активную зону, оборудование, связанное с активной зоной, и предусматриваемые в проекте меры по обеспечению безопасной эксплуатации активной зоны. Безопасное обращение с топливом и другими компонентами активной зоны обсуждено в [3].

1.6. В настоящем руководстве по безопасности рассмотрены внутрикорпусные устройства реактора и смонтированные на корпусе реактора устройства¹ для управления реактивностью и останова. Взаимодействия этих внутрикорпусных компонентов и устройств с теплоносителем реактора и компонентами системы теплоносителя реактора, включая первый контур (т.е. включая корпус ядерного реактора или каналы под давлением), рассматриваются только в той мере, в какой это необходимо для того, чтобы разъяснить связь с руководством по

¹ В настоящем руководстве по безопасности термин 'устройство' (например, устройство для останова или управления реактивностью) используется для обозначения детали (независимо от ее формы, материала или назначения), введенной в активную зону (например, регулирующего стержня или трубы, содержащей жидкость для управления реактивностью). Термин 'устройство' может включать приводной механизм для деталей. В противоположность этому термин 'средство' (например, средство для останова или управления реактивностью) используется для обозначения в более широком масштабе функционального аспекта компонента или системы.

безопасности «Проектирование системы теплоносителя реактора и связанных с ней систем АЭС» [4] и другими руководствами по безопасности. В руководящих материалах, касающихся систем КИП и СУЗ, приведены главным образом функциональные соображения.

1.7. В настоящем руководстве по безопасности рассмотрены следующие конструкции, системы и элементы, расположенные в корпусе реактора:

- *Топливные сборки* и те конструкции, которые удерживают топливные сборки и другие компоненты в заранее определенной геометрической конфигурации. Рассмотрены также замедлитель и теплоноситель в активной зоне.
- *Элементы и конструкции*, используемые для управления реактивностью и останова, включая нейтронные поглотители (твердые или жидкие), соответствующую конструкцию и приводной механизм и связанные с ними компоненты гидравлической системы.
- *Опорные конструкции*, поддерживающие активную зону в корпусе реактора, конструкции, направляющие поток, такие как корзина активной зоны или каналы под давлением корпусного тяжеловодного реактора (PHWR, канального типа), и направляющие трубы устройств управления реактивностью.
- *Другие внутрикорпусные устройства реактора*, такие как трубы для контрольно-измерительной аппаратуры, внутриреакторные контрольно-измерительные приборы, сепараторы пара и источники нейтронов. Они рассматриваются в ограниченных масштабах только в настоящем руководстве по безопасности.

СТРУКТУРА

1.8. В разделе 2 изложены основные соображения для проектирования активной зоны с учетом аспектов безопасности, в дополнение к требованиям, установленным в [1]. В разделе 3 обсуждены детальные соображения относительно проектирования с учетом аспектов безопасности для каждого компонента активной зоны реактора и соответствующего проектирования для безопасной эксплуатации. Раздел 4 посвящен аттестации и испытаниям. В разделе 5 рассмотрено обеспечение качества при проектировании. Некоторые конкретные технические аспекты обсуждаются в Дополнениях I–V.

2. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С УЧЕТОМ АСПЕКТОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. Цели и концепции безопасности, представленные в [5] и воспроизведенные в разделе 2 документа [1], являются следующими:

“Общая цель ядерной безопасности: защитить отдельных лиц, общество и окружающую среду от вредных последствий путем создания и поддержания на ядерных установках эффективных средств защиты от радиационной опасности.

“Цель радиационной защиты: обеспечивать, чтобы дозы облучения во всех эксплуатационных состояниях на установке или в результате любого запланированного выброса радиоактивных материалов с установки поддерживались ниже предписанных пределов и на разумно достижимом низком уровне, а также обеспечивать смягчение радиологических последствий любых аварий.

“Техническая цель безопасности: принять все практически осуществимые меры для предотвращения аварий на ядерных установках и смягчения их последствий, если они произойдут; обеспечивать высокую степень уверенности в том, что любые радиологические последствия всех возможных аварий, учитываемых в проекте установки, включая те, вероятность которых крайне мала, были незначительными и находились ниже предписанных пределов; а также обеспечить, чтобы вероятность аварий с серьезными радиологическими последствиями была чрезвычайно мала.

“Цели безопасности требуют, чтобы ядерные установки проектировались и эксплуатировались таким образом, чтобы все источники, вызывающие облучение, находились под строгим техническим и административным контролем. Однако цель радиационной защиты не исключает ограниченных доз облучения населения или выброса официально разрешенных количеств радиоактивных материалов в окружающую среду от установок во время эксплуатационных состояний. Такие дозы облучения и выбросы, однако, необходимо строго контролировать и необходимо обеспечивать их соответствие эксплуатационным пределам и нормам радиационной защиты”.

Требования к глубокоэшелонированной защите как к концепции безопасности также установлены в [1] (пункт 4.1). Вкратце можно сказать, что применение концепции глубокоэшелонированной защиты при проектировании АЭС приводит к ряду уровней защиты (внутренне присущие свойства, оборудование и процедуры), имеющих целью предотвращение аварий и обеспечение соответствующей защиты в случае, если предотвращение окажется безуспешным.

2.2. При проектировании активной зоны ([1], пункт 4.2), требуется предусматривать с целью сохранения глубокоэшелонированной защиты, насколько это практически осуществимо, предотвращение событий трех типов:

- (1) “возникновение проблем, связанных с целостностью физических барьеров;
- (2) отказ барьера при возникновении проблемы;
- (3) отказ барьера вследствие отказа другого барьера”.

Например, станцию следует проектировать таким образом, чтобы: из топливных таблеток не высвобождалось чрезмерное количество радиоактивных продуктов деления; топливо не создавало проблем для целостности оболочки твэлов; целостность оболочки твэлов поддерживалась, насколько это практически возможно, во всех условиях эксплуатации и в переходных режимах; и отказ оболочки топлива не распространялся и не приводил к отказу корпуса ядерного реактора или каналов под давлением. Следует также рассматривать любые воздействия на другие барьеры, возникающие в результате этого поведения активной зоны, с тем чтобы обеспечить полное соответствие конструкции активной зоны предъявляемым требованиям [1].

2.3. При проектировании активной зоны следует рассматривать, в эксплуатационных состояниях и в широком диапазоне аварийных условий, три основополагающих функции безопасности:

- (1) управление реактивностью;
- (2) отвод тепла от активной зоны;
- (3) локализацию радиоактивного материала и контроль эксплуатационных сбросов, а также ограничение аварийных радиоактивных выбросов.

Выполнение этих функций следует обеспечивать посредством надлежащего проектирования активной зоны и связанных с ней систем, с тем чтобы обеспечивалась их работоспособность и надежность ([1], пункт 4.6).

2.4. При проектировании активной зоны следует предусматривать сведение к минимуму отрицательных последствий в широком диапазоне постулируемых исходных событий (см. пункт 4.7 и Дополнение I, [1]; см. также текст под заголовком «Анализ безопасности» в разделе 3 настоящего руководства по безопасности).

2.5. Вкратце, при рассмотрении общих конструктивных особенностей следует принимать во внимание: соответствующие запасы безопасности; нормы безопасности по радиационной защите [6–8]; статические и динамические нагрузки; максимальную скорость ввода реактивности и количество вводимой реактивности; возникновение послеварийной повторной критичности; и инспекции и испытания на протяжении срока службы станции ([1], пункты 6.1–6.5).

2.6. Проектирование, изготовление, монтаж, строительство, испытания и инспекции конструкций, систем и элементов активной зоны следует проводить в соответствии с надлежащими национальными или международными сводами положений и нормами или практикой ([1], пункт 3.6).

2.7. Необходимо проводить рассмотрение конструкции активной зоны и, в случае необходимости, вносить в нее соответствующие изменения в тех случаях, когда в течение срока службы станции происходит значительное изменение конфигурации в результате, например:

- использования топлива на основе смеси оксида урана и оксида плутония (смешанного оксидного топлива);
- повышения глубины выгорания выгружаемой топливной сборки;
- увеличения продолжительности топливного цикла;
- повышения номинальной мощности станции.

2.8. В эксплуатационных режимах (при нормальной эксплуатации и ожидаемых при эксплуатации событиях) требуется поддерживать целостность топливных элементов; в случае проектных аварий требуется обеспечивать, чтобы любые повреждения топливных элементов были сведены к минимуму ([1], пункты 6.1 и 6.35). Компоненты активной зоны реактора и связанные с ними конструкции следует проектировать с учетом функций безопасности, которые должны осуществляться во время проектных аварий и после них (например, останов реактора, аварийное охлаждение активной зоны, долгосрочное стабильное охлаждение и управление реактивностью и локализация радиоактивного материала). Подход к смягчению последствий запроектных аварий кратко изложен в [1], пункт 5.31.

2.9. При проектировании и компоновке конструкций, систем и элементов активной зоны реактора требуется принимать меры, обеспечивающие, чтобы дозы излучения, получаемые населением и персоналом на площадке во всех эксплуатационных состояниях, включая техническое обслуживание, испытания и инспекции и снятие с эксплуатации, не превышали разрешенных пределов и сохранялись на разумно достижимом низком уровне [1, 5–7].

2.10. Дополнительные требования к проектированию активной зоны изложены в [1], пункты 6.6–6.20, в подразделах “Тепловыделяющие элементы и сборки”, “Управление активной зоной реактора” и “Останов реактора”. В следующих ниже пунктах приведены соответствующие руководящие материалы по проектированию.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

2.11. Следует обеспечивать, чтобы проект активной зоны реактора был таким, чтобы характеристики обратной связи активной зоны быстро компенсировали увеличение реактивности. Мощность реактора следует контролировать посредством комбинированного использования внутренне присущих нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора, ее термогидравлических характеристик и возможностей систем управления и останова, которые должны срабатывать во всех эксплуатационных состояниях и в условиях проектной аварии. Когда требуются быстродействующие системы управления или останова, следует полностью обосновать их рабочие характеристики (например, быстродействие и надежность). (Дополнительная информация по внутренне присущим нейтронно-физическим характеристикам и коэффициентам реактивности приведена в Дополнении I.)

2.12. В соответствии с пунктом 4.6 [1], максимальную скорость введения положительной реактивности в эксплуатационных состояниях и в случае проектных аварий следует ограничивать таким образом, что средства снижения мощности реактора, описанные в пункте 2.11, эффективно обеспечивали продолжение охлаждения активной зоны, сведение к минимуму повреждений активной зоны и предотвращение отказа первого контура теплоносителя реактора. Следует предусмотреть надлежащую основу проекта для топливных элементов, с тем чтобы предотвратить нежелательные последствия аварий, вызванных ростом реактивности (например, посредством установления пределов максимальной энтальпии топлива или повышения энтальпии топлива).

2.13. Следует предусмотреть по меньшей мере две независимых и разнотипных системы останова (в отношении дополнительной информации см. пункты 6.3–6.20 [1] и обсуждение средств останова реактора в разделе 3).

2.14. При проектировании следует выполнить для репрезентативных эксплуатационных состояний расчет распределения мощности в активной зоне, с тем чтобы получить информацию для использования при определении: (а) эксплуатационных пределов и условий; (b) уставок для срабатывания защитных систем безопасности; (с) эксплуатационных процедур, которые обеспечат соблюдение проектных пределов, в том числе проектных параметров активной зоны, в течение всего срока эксплуатации активной зоны реактора.

2.15. Устройства управления реактивностью следует использовать для поддержания реактора в подкритическом состоянии с учетом возможных проектных аварий и их последствий. При проектировании следует предусмотреть надлежащие меры для поддержания подкритичности в таких состояниях станции, в которых временно заблокированы нормальный останов, охлаждение топлива или обеспечение герметичности системы охлаждения первого контура, например, в тех случаях, когда корпус ядерного реактора открыт для проведения технического обслуживания или перегрузки топлива.

2.16. Следует предусмотреть, насколько это практически осуществимо, возможность тестирования систем останова в ходе эксплуатации, с тем чтобы обеспечить уверенность в готовности систем к срабатыванию по требованию.

ТЕРМОГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

2.17. Проектные пределы термогидравлических параметров, таких как максимальная линейная интенсивность энерговыделения, минимальный коэффициент запаса до кризиса энерговыделения, минимальный коэффициент запаса до кризиса кипения, пиковая температура топлива и температура оболочки следует устанавливать таким образом, чтобы обеспечивались достаточные запасы в эксплуатационных состояниях, позволяющие сохранять на приемлемо низком уровне интенсивности отказов топливных элементов в условиях проектной аварии.

2.18. С целью соблюдения проектных пределов во всех эксплуатационных состояниях, включая перегрузку топлива, следует предусмотреть соответствующие контрольно-измерительные средства и средства управления, позволяющие безопасным образом контролировать и корректировать

параметры, характеризующие условия в активной зоне (например, расход теплоносителя, температуру теплоносителя и поток нейтронов).

2.19. Для оценки состояния активной зоны и связанных с ней функций в аварийных условиях требуется предусмотреть соответствующую контрольно-измерительную аппаратуру для мониторинга (см. [1], пункт 6.68).

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

2.20. Топливные элементы, управляющие устройства, выгорающие поглотители и топливные сборки следует проектировать таким образом, чтобы герметичность оболочки обеспечивалась во всех эксплуатационных состояниях в течение всего жизненного цикла.

2.21. При проектировании топливных элементов, управляющих устройств, выгорающих поглотителей и топливныхборок следует учитывать эффекты, связанные с воздействием температуры, давления, облучения, продуктов деления, статических и динамических механических нагрузок, включая сейсмические нагрузки, создаваемые потоком теплоносителя вибрации и изменения химических характеристик составляющих материалов.

2.22. Следует предусмотреть средства для безопасного обращения с компонентами активной зоны, такими, как топливные сборки, устройства для управления и останова и опорные конструкции активной зоны, с тем чтобы обеспечивать их целостность при перевозке, хранении, монтаже и операциях перегрузки активной зоны (см. [3]).

2.23. Следует обеспечивать прочность конструкции активной зоны, с тем чтобы можно было осуществлять безопасное управление, остановку и охлаждение активной зоны в эксплуатационных состояниях и в условиях проектной аварии. Следует учитывать статические и динамические механические нагрузки, включая термические напряжения, действующие в эксплуатационных состояниях и в условиях проектной аварии.

2.24. Топливные сборки, другие внутрикорпусные компоненты реактора и систему охлаждения реактора следует проектировать таким образом, чтобы в любом эксплуатационном состоянии и в условиях проектной аварии сводилась к минимуму вероятность преграждения потока теплоносителя отделившимися незакрепленными деталями и предотвращалось повреждение активной зоны.

2.25. Активную зону и связанные с ней компоненты следует проектировать таким образом, чтобы они были совместимы друг с другом в условиях воздействия облучения и химических и физических процессов.

2.26. Следует не допускать неконтролируемого перемещения устройств управления реактивностью.

АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ, СВЯЗАННЫЕ С КЛАССИФИКАЦИЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ

2.27. В свете Требований безопасности ([1], пункты 5.1–5.3) и центральной роли, которую активная зона реактора играет в деле обеспечения безопасности, предполагается, что все компоненты активной зоны реактора и связанных с ней конструкций следует соответствующим образом классифицировать согласно их значимости с точки зрения безопасности.

2.28. Два барьера безопасности (собственно топливо и его оболочка) находятся в активной зоне, и выполнение двух важнейших функций безопасности (регулирования реактивности и охлаждения активной зоны) зависит от поддержания правильной конфигурации активной зоны и возможности доступа к устройствам. Кроме того, если произошла авария, приводящая к разрушению активной зоны, она потенциально может создать проблемы для барьера защитной оболочки. Поэтому следует провести надлежащую классификацию с точки зрения безопасности и, впоследствии, анализ, экспертизу и проверку, с тем чтобы обеспечить целостность активной зоны и поддерживать выполнение важнейших функций безопасности, заключающихся в регулировании реактивности и охлаждении активной зоны.

2.29. Для того, чтобы правильно провести классификацию, следует тщательно проанализировать последствия отказа каждой системы и компонента, включая последствия их возможного воздействия на другие системы и компоненты.

3. КОНКРЕТНЫЕ СВЯЗАННЫЕ С БЕЗОПАСНОСТЬЮ СООБРАЖЕНИЯ, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1. В данном разделе рассмотрены дальнейшие соображения, касающиеся проектирования компонентов активной зоны, имея в виду достижение целей и выполнение требований к проектированию, упомянутых в разделе 2. В нем также рассматривается управление активной зоной, которое оказывает существенное влияние на проектирование активной зоны, в том, что касается целостности топливных элементов, а также экономии топлива.

3.2. Некоторые устройства в активной зоне могут также выполнять функции безопасности, рассматриваемые в рамках других руководств по безопасности. При проектировании таких аппаратных средств следует учитывать рекомендации и руководящие материалы настоящего руководства по безопасности и других соответствующих руководств по безопасности, таких, как [3, 4, 9].

ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И СБОРКИ

3.3. Соображения, изложенные в этом подразделе, применимы как к урановому, так и к смешанному оксидному топливу.

Тепловые эффекты и эффекты, обусловленные выгоранием

3.4. При оценке температуры топливных таблеток в эксплуатационных состояниях следует учитывать изменения удельной теплопроводности таблеток и теплопроводности зазора между таблеткой и оболочкой вследствие таких зависящих от выгорания эффектов, как оксидное уплотнение, распухание, накопление продуктов деления и другие изменения микроструктуры таблеток. При определении температуры плавления топлива следует принимать во внимание изменения состава и микроструктуры топлива из-за эффектов, обусловленных выгоранием. Следует обеспечивать, чтобы во всех эксплуатационных состояниях пиковая температура топлива была ниже температуры плавления топлива с достаточным запасом, позволяющим предотвращать плавление топлива и учитывать неопределенности.

3.5. При проектировании топлива следует учитывать изменения его механических свойств (прочности, ползучести и релаксации напряжений) и изменения коррозионной стойкости оболочки в зависимости от температуры. Поэтому для различных эксплуатационных состояний могут быть определены пределы по нагрузке, длительной деформации и коррозии. Напряжения и деформации в оболочке могут явиться результатом набухания или теплового расширения топлива вследствие увеличения локальной мощности или внутреннего давления газов, и эти напряжения и деформации следует ограничивать.

3.6. При проектировании топливных элементов следует учитывать эффекты, обусловленные твердыми и газообразными продуктами деления, скорости выделения которых в значительной мере зависят от истории изменения мощности в течение нахождения ТВЭЛов в активной зоне. Следует учитывать влияние газообразных продуктов деления на внутреннее давление в топливном элементе и теплопроводность зазора между таблеткой и оболочкой. При проектировании следует также принимать во внимание влияние продуктов деления на коррозию оболочки. Вспучивание материала топлива вследствие образования продуктов деления приводит к изменению таких его свойств, как теплопроводность, и к изменению размеров; при проектировании эти изменения следует принимать во внимание.

3.7. При анализе безопасности следует учитывать последствия сброса давления в реакторе (при нормальной эксплуатации и после ожидаемых при эксплуатации переходных процессов, таких как процессы, инициируемые автоматической системой сброса давления) в смысле возможного повреждения оболочки и последующего выхода продуктов деления из топлива.

Радиационные эффекты

3.8. При проектировании следует учитывать радиационные эффекты, в частности воздействие быстрых нейтронов на топливные сборки (в том числе на управляющие устройства и выгорающие поглотители), на такие механические свойства, как прочность на растяжение оболочки, характеристики пластичности и ползучести, уплотнение и вспучивание топлива (в радиальном и осевом направлениях), и на геометрическую стабильность всех материалов.

Влияние изменений уровня мощности

3.9. При проектировании следует учитывать влияние на целостность оболочки ТВЭЛов локальных и общереакторных энергетических переходных процессов, вызываемых перестановками топлива, перемещениями управляющих

устройств или другими изменениями реактивности. Одним из возможных последствий этих изменений мощности является растрескивание оболочки топлива вследствие взаимодействия “таблетка-оболочка” (см. Дополнение II).

3.10. Распределение мощности в активной зоне и топливных сборках в течение топливного цикла претерпевает изменения вследствие выгорания топлива. В связи с этим изменяются также избыточная реактивность активной зоны и коэффициенты реактивности активной зоны. Эти явления следует принимать во внимание при проектировании активной зоны и топлива.

3.11. При проектировании активной зоны и топлива следует принимать во внимание влияние ожидаемых мощностных переходных процессов на пиковые уровни тепловыделения.

Механические воздействия на топливные элементы

3.12. Следует сводить к минимуму коррозионное растрескивание, индуцированное взаимодействием “таблетка-оболочка” в присутствии продуктов деления. Контроль взаимодействия “таблетка-оболочка” описан в Дополнении II. Связанные с механической безопасностью соображения при проектировании топливных сборок обсуждены ниже в настоящем разделе.

3.13. Оболочка топливного элемента может быть спроектирована так, чтобы она была сжимающейся или устойчивой к воздействию рабочего давления теплоносителя. Устойчивая оболочка может подвергаться длительной деформации (деформации ползучести) под воздействием внешнего давления, приводящей к уменьшению радиального зазора между оболочкой и топливом. Некоторые оболочки, которые первоначально устойчивы, будут, в конечном счете, обжиматься вокруг таблеток и поддерживаться ими. Сжимающаяся оболочка быстро напрессовывается на топливные таблетки под воздействием внешнего давления, и внешняя охлаждаемая часть топливной таблетки поддерживает оболочку в течение всего срока ее службы. Радиальный зазор между сжимающейся оболочкой и топливными таблетками следует ограничивать, с тем чтобы предотвратить образование на оболочке чрезмерных продольных гофров.

3.14. Возникновение в оболочке напряжений и деформаций может явиться результатом распухания или теплового расширения топлива вследствие увеличения локальной мощности или внутреннего давления газа. Такие напряжения и деформации оболочки следует ограничивать, с тем чтобы не создавать угрозы для безопасного функционирования топлива.

3.15. При проектировании топлива следует учитывать механические нагрузки, воздействующие на оболочку из-за длины ее неподдерживаемой части, осевых зазоров между топливными таблетками, уплотнения топлива или в силу других причин.

Влияние выгорающих поглотителей в топливных элементах

3.16. Следует надлежащим образом рассмотреть вопрос о потенциальном неблагоприятном воздействии выгорающих поглотителей в топливе на его термодинамические параметры, и на химические, механические и металлургические свойства топлива и материала оболочки. Следует учитывать вероятность того, что добавление выгорающих поглотителей может увеличить выход из топливных таблеток летучих продуктов деления. Следует также учитывать воздействие выгорающих поглотителей на реактивность активной зоны, на температурные коэффициенты реактивности топлива и замедлителя и на коэффициенты локальной неравномерности энерговыделения.

Коррозия и гидрирование топливных элементов

3.17. Топливные сборки следует проектировать таким образом, чтобы они были совместимы с окружающим их теплоносителем во всех эксплуатационных состояниях, включая останов и перегрузку топлива. Коррозия и гидрирование сильно зависят от свойств материала оболочки и от температуры, от присутствия оксидов и от напряжений и деформаций. Следует принимать во внимание такие параметры среды для жидкого теплоносителя, как чистота воды, локальное кипение, давление, температура и химический состав жидкой среды. На практике контроль коррозии осуществляют посредством соответствующего воднохимического режима (т.е., поддерживая низкое содержание кислорода и соответствующие значения рН).

3.18. Окисление или другие химические процессы могут приводить к образованию на поверхности оболочки отложений, которые могут воздействовать на передачу тепловой энергии от топливного элемента, и поэтому их следует принимать во внимание при термогидравлическом анализе. При проектном определении диапазонов параметров теплоносителя в эксплуатационных состояниях следует принимать во внимание последующие эффекты поверхностного окисления и накопления отложений. Топливо с глубоким проектным выгоранием (см. Дополнение IV) требует дополнительного рассмотрения при проектировании, с тем чтобы ограничить поверхностное окисление при нормальной эксплуатации. Используемые проектные параметры

следует задавать, основываясь на опыте эксплуатации и/или экспериментах, которые соответствуют условиям эксплуатации.

3.19. Следует ограничивать содержание водорода в циркониевом сплаве оболочки, с тем чтобы снизить вероятность топливных дефектов, являющихся результатом охрупчивания оболочки в процессе эксплуатации. С этой целью следует контролировать влажность в свободном пространстве внутри топливных элементов.

Термогидравлические эффекты в топливных сборках

3.20. При проектировании следует принимать во внимание эффекты, зависящие от дистанционирования топливных элементов, их мощности, размеров и конфигурации подканалов, наличия сеток, распорок, фигурных скобок, дефлекторов потока или устройств, обеспечивающих турбулентность потока. Эти эффекты являются прежде всего термогидравлическими, но они могут потенциально включать местную коррозию, эрозию, создаваемую потоком теплоносителя вибрацию и фреттинг-коррозию. Мощность в стационарном режиме следует поддерживать на уровнях, при которых существуют некоторые соотношения или запасы, позволяющие избежать условий возникновения критического теплового потока. Следует обеспечивать, чтобы эти запасы были достаточны с точки зрения ожидаемых при эксплуатации событий². Соотношения между критическими и фактическими параметрами могут быть выражены в виде минимального коэффициента запаса по критическому тепловому потоку, минимального коэффициента запаса до кризиса кипения, минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена канала или минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена активной зоны. Эти соотношения ведут к консервативной проектной основе для эксплуатационных состояний в случае водоохлаждаемых реакторов.

3.21. На критический тепловой поток (КТП) и коэффициент запаса до кризиса теплообмена (КЗКТ) оказывают влияние конкретная конструкция топливной сборки и условия теплоносителя (например, локальные эффекты, определяемые наличием распорок топливных элементов и локальным недогревом и/или качеством теплоносителя). Для получения данных с целью определения

² Цель этой рекомендации состоит в том, чтобы избежать отказов оболочки, вызываемых высокими температурами материала оболочки. В некоторых конструкциях можно допустить критические условия теплового потока во время переходных процессов, если с помощью других методов может быть показано, что температуры оболочки не превышают допустимых пределов.

предельных значений КТП, минимального коэффициента запаса до кризиса кипения или КЗКТ при проектировании и для целей анализа безопасности следует провести эксперименты во всем диапазоне ожидаемых эксплуатационных условий.

Связанные с механической безопасностью соображения при проектировании

3.22. Топливная сборка испытывает механические напряжения в результате:

- обращения с топливом и его загрузки;
- изменения мощности;
- нагрузки от прижимных устройств в PWR;
- воздействия температурных градиентов;
- гидравлических воздействий, включая поперечные потоки между открытыми топливными сборками;
- облучения (например, радиационно-индуцированного роста и распухания);
- вибраций и фреттинг-коррозии, индуцированных потоком теплоносителя;
- деформации, вызываемой ползучестью;
- внешних событий, таких как землетрясения;
- постулируемых исходных событий, таких как аварии с потерей теплоносителя.

3.23. Для эксплуатационных состояний, соображения, касающиеся проектирования топливной сборки (в которой могут находиться кожуха для регулирующих устройств, мониторов потока и выгорающих поглощающих стержней), включают следующее:

- (a) следует предусматривать, чтобы зазоры внутри топливной сборки и вне ее были достаточны для компенсации увеличения размеров и распухания при облучении³;
- (b) следует ограничивать прогиб топливных элементов, с тем чтобы он не оказывал значительного влияния на термогидравлическое поведение и характеристики топлива;

³ В BWR разность давлений внутри и снаружи границы кожуха канала может вызывать распухание кожуха. Эта деформация, а также прогиб твэлов могут впоследствии приводить к увеличению локального коэффициента неравномерности нейтронного потока.

- (с) следует обеспечивать, чтобы не возникали отказы топливных сборок вследствие усталостной деформации материалов;
- (d) следует обеспечивать, чтобы топливная сборка выдерживала механические и гидравлические нагрузки от прижимных устройств без неприемлемых деформаций;
- (e) следует обеспечивать, чтобы повреждения в результате вибраций или фреттинг-коррозии не оказывали неприемлемого влияния на осуществление функций топливных сборок и опорных конструкций;
- (f) следует обеспечивать, чтобы топливная сборка выдерживала облучение, а ее материалы были совместимы с химическими свойствами теплоносителя;
- (g) следует обеспечивать, чтобы любая деформация топливного элемента или топливной сборки не оказывала влияния на возможность введения регулирующих стержней с целью безопасного останова реактора.

3.24. В состояниях станции, варьирующихся в диапазоне от ожидаемых при эксплуатации событий до условий проектной аварии, топливные элементы, топливные сборки и опорные конструкции топливных сборок следует проектировать таким образом, чтобы обеспечивалось, что любые интерактивные эффекты или последующие воздействия этих компонентов не препятствовали выполнению системами безопасности своих функций так, как это требуется в анализе безопасности, посредством:

- воспрепятствования функционированию компонентов систем безопасности (например, устройств для останова и их направляющих труб);
- ухудшения охлаждения активной зоны;
- неприемлемого механического или теплового повреждения границ контура давления системы теплоносителя реактора.

ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ

3.25. Следует обеспечивать физическую и химическую стабильность теплоносителя при воздействии высоких температур и радиационного облучения, с тем чтобы он выполнял свою основную функцию: непрерывный отвод тепла от активной зоны. Следует предусмотреть, чтобы соображения безопасности, связанные с теплоносителем, включали:

- (a) обеспечение того, чтобы перед первоначальным пуском реактора и в течение срока службы станции система теплоносителя была свободна от посторонних предметов и обломков;

- (b) поддержание радиоактивности теплоносителя на приемлемо низком уровне путем использования систем очистки и надлежащего удаления дефектного топлива;
- (c) учет влияния теплоносителя и добавок в теплоносителе⁴ на реактивность и, в частности, эффектов при определении возможностей систем управления реактора и систем останова в эксплуатационных состояниях и при проектных авариях;
- (d) определение и контроль физических и химических свойств теплоносителя в активной зоне для обеспечения совместимости с другими компонентами активной зоны реактора и сведения к минимуму коррозии и радиоактивного загрязнения системы теплоносителя реактора;
- (e) обеспечение достаточной подачи теплоносителя при всех эксплуатационных состояниях и в случае проектных аварий;
- (f) обеспечение того, чтобы конструкция активной зоны позволяла предотвращать или контролировать нестабильности потока и результирующие изменения реактивности.

Легководные реакторы

3.26. В PWR и BWR теплоноситель выполняет также функцию замедлителя. Поэтому при проектировании активной зоны следует также учитывать влияние изменений плотности теплоносителя (в том числе изменений жидкой фазы) на реактивность активной зоны и на локальное и суммарное энерговыделение в ней.

3.27. Химические добавки к теплоносителю используются в качестве поглотителей нейтронов, представляя собой вторую систему контроля реактивности активной зоны; пример этого – борная кислота, используемая в PWR. Другие добавки используются для контроля химического состава теплоносителя (например, для контроля водородного показателя pH и содержания кислорода) с целью снижения коррозии компонентов активной зоны и внутрикорпусных устройств реактора или уменьшения радиоактивного загрязнения системы теплоносителя реактора. Всякий раз, когда используются добавки, при проектировании активной зоны следует принимать во внимание их воздействие на компоненты активной зоны.

⁴ В некоторых типах реакторов принято обеспечивать такое положение, при котором добавки в теплоносителе не приводят к возникновению положительного мощностного коэффициента реактивности. (Подробное обсуждение коэффициентов реактивности см. в Дополнении I.)

3.28. При проектировании следует предусматривать средства контроля продуктов коррозии и водорода, образующихся в результате радиолитического разложения теплоносителя (см. [4]).

Тяжеловодные реакторы

3.29. Соответствующие свойства тяжелой воды в основном аналогичны свойствам легкой воды. Факторы, рассмотренные применительно к LWR в пунктах 3.26–3.28, следует также применять в отношении тяжелой воды. Следует отметить, что в некоторых конструкциях HWR канального типа теплоноситель и замедлитель реактора разделены; обычно химические реагенты с целью контроля реактивности в теплоноситель не добавляют.

3.30. Следует также учитывать процесс радиоактивации. В HWR в больших количествах накапливается тритий (^3H). Поэтому в системах теплоносителя и системах замедлителя HWR следует предусматривать меры по предотвращению или контролю утечек насыщенной тритием тяжелой воды из замкнутых систем циркуляции воды. При проектировании следует рассмотреть меры по ограничению концентрации трития в воздухе, с тем обеспечить такое положение, при котором дозы облучения персонала площадки во всех эксплуатационных состояниях, включая техническое обслуживание и инспекции и снятие с эксплуатации, не превышали разрешенных пределов и находились на разумно достижимом низком уровне [1, 5–7].

ЗАМЕДЛИТЕЛЬ

3.31. Выбор замедлителя и расстояний между находящимися в нем топливными сборками основан на необходимости оптимизации баланса нейтронов и тем самым расхода топлива, а также удовлетворения инженерно-технических требований. В основных типах реакторов в качестве замедляющей среды используют легкую воду или тяжелую воду:

- PWR: легководный замедлитель;
- BWR: легководный замедлитель;
- PHWR (канального типа): тяжеловодный замедлитель;
- PHWR (корпусного типа): тяжеловодный замедлитель.

Легководные реакторы

3.32. Легкая вода используется в качестве замедлителя и теплоносителя как в PWR, так и в BWR; при этом две указанные функции физически не разделены. Поэтому применимы те соображения в отношении теплоносителя, которые обсуждены в пунктах 3.26–3.29.

Тяжеловодные реакторы

3.33. В реакторах PHWR замедлитель физически отделен от теплоносителя стенками каландра и каналов. Иногда в замедлителе могут содержаться небольшие количества растворимого нейтронного поглотителя для компенсации реактивности в ходе эксплуатации или более значительные количества для обеспечения подкритичности (обычно в период первоначального выхода на равновесный режим работы топлива). Проектирование следует выполнять с таким расчетом, чтобы во время аварии с разбавлением поглотителя (например, при разрыве в активной зоне) обеспечивалась эффективность функции останова реактора и поддержания его в остановленном состоянии. Следует предусмотреть средства для предотвращения непреднамеренного удаления такого поглощающего материала (например, вследствие переходных химических процессов) и обеспечить низкие темпы его контролируемого удаления.

3.34. В некоторых PHWR для обеспечения долгосрочного удерживания реактивности на низком уровне второй системой останова требуется долгосрочный контроль водородного показателя pH и окислительного потенциала.

3.35. Ввиду радиолитического замедлителя следует предусмотреть меры для борьбы с коррозией и предотвращения мгновенного сгорания и взрыва водорода, как обсуждено в [4].

3.36. С целью применения концепции глубокоэшелонированной защиты в эксплуатационных состояниях, а также в некоторых условиях проектной аварии и условиях серьезной аварии, следует предусмотреть, чтобы замедлитель в PHWR (в HWR как канального, так и корпусного типа) обеспечивал возможность отвода тепла радиоактивного распада без нарушения геометрии активной зоны.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТИВНОСТИ И СРЕДСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

3.37. В настоящем разделе обсуждаются характеристики реактивности активной зоны при нормальной эксплуатации и в ограничительных условиях для целей анализа аварий, а также средств регулирования реактивности при нормальной эксплуатации.

Характеристики реактивности активной зоны

3.38. На основе данных о геометрии и компоновке активной зоны реактора ядерные оценочные расчеты при проектировании позволяют получить пространственные распределения нейтронного потока и мощности в стационарном режиме, нейтронно-физические характеристики активной зоны и сведения об эффективности средств регулирования реактивности при нормальной эксплуатации станции на мощности и в режимах остановки. Внутренне присущие нейтронно-физические характеристики представлены коэффициентами реактивности и параметрами, обсужденными в Дополнении I.

3.39. В пункте 2.11 приведены рекомендации относительно требуемой реакции активной зоны на непреднамеренное увеличение реактивности. Причиной этих рекомендаций является необходимость ограничить результирующий рост энерговыделения в топливе, с тем чтобы предотвратить распространение аварии. Этот предел необходим для обеспечения выполнения требования, изложенного в пункте 4.2 [1]. При анализе всех проектных аварий и ожидаемых при эксплуатации событий следует исходить из достаточно консервативных допущений в отношении коэффициентов реактивности.

3.40. Для каждого состояния активной зоны и для соответствующей стратегии обращения с топливом следует оценивать ключевые параметры реактивности, такие как коэффициенты реактивности (см. Дополнение III). Следует принимать во внимание их зависимость от загрузки активной зоны и глубины выгорания топлива.

Типы и эффективность средств регулирования реактивности

3.41. Средства регулирования реактивности следует проектировать таким образом, чтобы обеспечивалась возможность поддержания в безопасных эксплуатационных пределах уровня мощности и распределения мощности. Это включает компенсацию изменений реактивности (таких, как изменения, связанные с нормальными переходными процессами мощности, изменениями

концентрации ксенона, эффектами, связанными с температурными коэффициентами, с расходом теплоносителя или изменениями температуры, с обеднением ядерного топлива и выгоранием поглотителя и с совокупным отравлением продуктами деления) таким образом, чтобы технологические параметры поддерживались в установленных эксплуатационных пределах.

3.42. В средствах регулирования реактивности и средствах остановки реактора могут использоваться общие устройства при условии, что возможность остановки реактора сохраняется постоянно и с достаточным запасом (см. [1], пункт 6.13).

3.43. К средствам регулирования реактивности, используемым для регулирования реактивности активной зоны и энергораспределения в различных типах реакторов, относятся:

- применение стержней и пластин, содержащих твердые поглотители нейтронов (в PWR, BWR и PHWR);
- использование растворимого поглотителя в замедлителе или теплоносителе (в PWR и PHWR);
- регулирование расхода теплоносителя (плотности замедлителя) (в BWR);
- использование топлива с распределенным или дискретным выгорающим поглотителем;
- регулирование температуры замедлителя (в PHWR корпусного типа);
- регулирование высоты замедлителя (в устаревших PHWR канального типа);
- использование жидкого поглотителя в каналах (в PHWR);
- использование схем, предусматривающих перегрузку и загрузку топлива партиями;
- использование перегрузки на мощности (в PHWR канального и корпусного типа).

3.44. Эффективность средств регулирования реактивности может быть представлена коэффициентами реактивности и/или интегральной эффективностью поглотителей, которая будет зависеть от конструкции активной зоны реактора и связанного с ней обращения с топливом. Эффективность устройств регулирования реактивности, таких как стержни поглотителей нейтронов, следует проверять путем непосредственных измерений.

3.45. При анализе аварий следует исследовать и принять во внимание, сбалансированно учитывая необходимость обеспечения эффективности средств регулирования реактивности при нормальной эксплуатации, большинство

неблагоприятных условий для соответствующего оборудования (например, последствия интегральной и дифференциальной реактивности групп регулирующих стержней при авариях вследствие извлечения регулирующих стержней и, в случае PWR, дифференциальной реактивности растворимого бора при авариях с непреднамеренным разбавлением).

Максимальная реактивная способность и скорость введения реактивности

3.46. Компоновку, группировку, скорость выведения и последовательности выведения устройств регулирования реактивности, используемых совместно с системой блокировки, следует предусмотреть в проекте таким образом, чтобы любое вероятное аномальное выведение устройств не приводило к превышению установленных для топлива пределов.

3.47. Максимальную реактивную способность устройств регулирования реактивности следует ограничивать или следует предусмотреть системы блокировки, с тем чтобы при соответствующих проектных авариях, таких как аварии вследствие выброса регулирующего стержня в реакторах PWR или вследствие падения регулирующего стержня в реакторах BWR, результирующая мощность при переходном процессе не превышала установленных пределов. Эти пределы следует выбирать таким образом, чтобы обеспечить приемлемо низкую степень:

- (1) повреждения топливных таблеток и оболочки, которое могло бы привести к выбросу радиоактивного материала в теплоноситель;
- (2) риска взаимодействия расплавленного топлива с теплоносителем, которое могло бы привести к повреждению конструкции активной зоны и помешать введению устройств остановки.

При оценке этих аварий, инициируемых внезапным ростом реактивности, следует также принимать во внимание эффекты, связанные с выгоранием топлива и типом топлива (например, топлива на основе диоксида урана или смешанного оксидного топлива).

3.48. Что касается растворимых поглотителей, то систему регулирования реактивности следует проектировать таким образом, чтобы предотвратить любое уменьшение концентрации поглотителя в активной зоне, которое могло бы приводить к превышению установленных пределов для топлива. Те части систем, которые содержат растворимые поглотители, такие как борная кислота, следует проектировать таким образом, чтобы не допустить осаждения (например, путем нагревания компонентов) (см. [4]). Следует обеспечивать

контроль концентраций растворимого поглотителя во всех баках - хранилищах. В случае использования обогащенного 10В следует обеспечивать надлежащий мониторинг.

3.49. Следует провести детальный функциональный анализ систем управления, с тем чтобы определить возможности возникновения непреднамеренного разбавления бора при эксплуатации и в режимах останова и обеспечивать адекватность предупредительных мер. Такими предупредительными мерами являются: постоянная административная блокировка (клапанов или частей контура); активные меры по изоляции; блокировки внешних инъекционных систем; мониторинг концентраций бора в связанных емкостях или системах труб; и блокировки запуска циркуляционных насосов.

3.50. Для PWR последствия локального разбавления борного поглотителя в активной зоне следует оценивать как событие, вызванное введением реактивности, которое происходит вследствие конденсации оттока в парогенераторе в специфических условиях аварии с потерей теплоносителя при небольшом разрыве.

Контроль общей и локальной мощности

3.51. Используя средства регулирования реактивности, общую и локальную мощность активной зоны следует контролировать таким образом, чтобы пиковое линейное энерговыделение каждого тепловыделяющего элемента и канала не превышало проектных пределов в любой точке активной зоны. При проектировании системы регулирования следует учитывать колебания энергораспределения, вызываемые локальными колебаниями реактивности из-за ксеноновой неустойчивости, изменения состояния теплоносителя и изменения положений и характеристик детекторов потока. Дополнительная информация приводится в части раздела 3, посвященной управлению активной зоной, и в Дополнении III.

3.52. В PWR контроль над быстрыми изменениями уровня мощности осуществляется автоматически путем перемещения регулирующих стержней. Группы регулирующих стержней следует размещать таким образом, чтобы избежать больших радиальных и осевых искажений распределения мощности. Это может быть сделано, например, посредством симметричного размещения групп регулирующих стержней для обеспечения радиальной симметрии распределения мощности, или путем частичного введения и перекрытия групп регулирующих стержней таким образом, чтобы избежать осевых искажений энерговыделения, которые могут привести к неблагоприятным ксеноновым

колебаниям. Ксеноновые колебания можно также контролировать вручную или автоматически путем корректировок концентрации бора в теплоносителе реактора. Долговременная компенсация изменений реактивности вследствие выгорания топлива достигается путем снижения концентрации бора в теплоносителе.

3.53. В BWR контроль над быстрыми изменениями уровня мощности осуществляется путем либо корректировки производительности циркуляционных насосов, либо перемещения регулирующих стержней. В этой связи следует обеспечивать, чтобы в эксплуатационных условиях для BWR был предусмотрен достаточный запас для компенсации термогидравлических неустойчивостей. Следует провести расчетный анализ активной зоны реактора, с тем чтобы продемонстрировать термогидравлическую стабильность. Долгосрочная компенсация изменения реактивности вследствие выгорания топлива достигается путем непрерывного выведения регулирующих стержней в заранее определенной последовательности.

3.54. В некоторых PHWR управление быстрыми изменениями локального и общего уровней мощности обычно осуществляется путем корректировки уровней легкой воды в жидкостных зональных отсеках. Для целей регулирования применяются также, помимо замедлителя, твердофазные стержни-поглотители и/или корректирующие стержни. Регулирование уровня замедлителя использовалось в более старых конструкциях реакторов. Долгосрочная компенсация изменения реактивности вследствие выгорания топлива достигается путем перегрузки топлива на мощности.

3.55. Следует обеспечивать такое введение регулирующих стержней, чтобы во всех эксплуатационных состояниях сохранялся достаточный запас устойчивости. При задании и мониторинге пределов введения регулирующих стержней в зависимости от уровня мощности следует гарантировать запас устойчивости.

Влияние выгорающего поглотителя

3.56. Следует оценить влияние выгорания выгорающего поглотителя на реактивность активной зоны, а затем следует обеспечить достаточный запас устойчивости во всех результирующих состояниях активной зоны на протяжении всего топливного цикла.

3.57. В PWR для сохранения отрицательного температурного коэффициента замедлителя проектировщику может потребоваться уменьшить количество поглотителя в замедлителе и восстановить нужный эффект поглощения путем

добавления в топливо выгорающего поглотителя. Выгорающий поглотитель может быть использован также для выравнивания энергораспределения мощности и уменьшения колебаний реактивности в процессе выгорания топлива.

Радиационные эффекты

3.58. При проектировании систем регулирования реактивности следует принимать во внимание такие эффекты облучения, как выгорание, изменение физических свойств, газообразование и распухание материалов поглотителя, и радиоактивное загрязнение теплоносителя реактора.

СИСТЕМЫ ОСТАНОВА РЕАКТОРА

3.59. В данном разделе рассматриваются средства, используемые для перевода реактора в подкритическое состояние в эксплуатационных состояниях и при проектных авариях, и средства поддержания его в этом состоянии.

3.60. Необходимо предусмотреть средства, обеспечивающие возможность перевода реактора в подкритическое состояние и поддержания его в этом состоянии, исходя из предположения о единичном отказе и возникновении наибольшей реактивности активной зоны, когда устройство для остановки, оказывающее наибольшее влияние на ее реактивность, не может быть введено в активную зону (предположение о заклинивании одного устройства для останова)⁵ ([1], пункт 6.13).

3.61. “ В целях обеспечения неодинаковости средства останова реактора должны состоять по меньшей мере из двух неодинаковых систем. Как минимум одна из этих двух систем должна быть способна с соответствующим запасом сама по себе быстро перевести ядерный реактор из эксплуатационных условий и из состояния проектной аварии в подкритическое состояние при допущении возникновения единичного отказа. В исключительных условиях допускается кратковременное восстановление критичности при условии, что не превышаются пределы, установленные для топлива и элементов конструкции” ([1], пункты 6.14 и 6.15).

⁵ Для некоторых конструкций, например, РНWR, в этом случае предполагается неготовность двух устройств управления аварийными стержнями, обладающими наивысшей реактивной способностью.

Задаваемые пределы для топлива и компонентов следует предусматривать в качестве набора проектных пределов для эксплуатационных состояний и для проектных аварий. Следует обеспечить отказоустойчивость конструкции этой системы. (Необходимые сведения о скорости см. в подразделе, посвященном скорости останова.)

3.62. “Как минимум одна из этих двух систем должна быть способна ... поддерживать реактор в подкритическом состоянии с соответствующим запасом и высокой надежностью даже в условиях наибольшей реактивности активной зоны” ([1], пункт 6.16). Следует обеспечивать, чтобы одна из этих систем была способна самостоятельно поддерживать реактор в подкритическом состоянии при любой температуре теплоносителя в активной зоне.

3.63. При выполнении требований в отношении длительного поддержания в подкритическом состоянии следует выявить намеренные действия, которые приводят к повышению реактивности в остановленном состоянии, такие как перемещение поглотителей для целей технического обслуживания, разбавление борного поглотителя и меры по перегрузке топлива, с тем чтобы учесть состояние наибольшей реактивности активной зоны.

3.64. Останов реактора после ожидаемых при эксплуатации событий и в случае проектных аварий является важным процессом, и эту важность следует признавать при проектировании систем останова. Не следует допускать превышения в эксплуатационных состояниях и при проектных авариях проектных пределов, таких как задаваемые пределы для топлива и пределы для первого контура системы теплоносителя реактора при каждом состоянии станции или при каждом условиях на ней. Необходимую надежность следует обеспечивать путем соответствующего проектирования оборудования. Следует предусматривать, чтобы проект обеспечивал необходимую независимость от технологических процессов и систем управления станции.

3.65. Если управление системой поддержания в подкритическом состоянии производится вручную или полуавтоматически, то следует обеспечить выполнение требуемых предварительных условий в отношении ручного управления [9].

3.66. Часть средств останова может использоваться для целей регулирования реактивности и формирования нейтронного потока при нормальной эксплуатации. Следует обеспечивать, чтобы такое использование средств останова при нормальной эксплуатации не могло создавать опасности для функционирования системы останова.

Различные средства останова

3.67. Для различных типов реакторов используются разные средства введения отрицательной реактивности в активную зону реактора, включая:

- инъекцию в замедлитель бора;
- инъекцию в замедлитель гадолиния;
- сброс замедлителя;
- введение бора и Ag-In-Cd и гафния в выполненных из нержавеющей стали стержнях, трубах или крестообразных пластинчатых элементах;
- введение слоистого кадмия в стальных трубах;
- введение гафния и стальных стержней в направляющих трубах из циркониевого сплава;
- введение жидкого поглотителя в трубах.

3.68. Эффективность этих материалов как поглотителей нейтронов будет зависеть от состава топлива, конструкции активной зоны реактора и управления активной зоной. Например, реактивная способность поглотителей тепловых нейтронов, таких как бор или Ag-In-Cd, для смешанного оксидного топлива оказывается более низкой, чем для уранового топлива. Изменение схемы загрузки активной зоны с 'от периферии к центру' на 'от центра к периферии' может повлиять на запас устойчивости.

3.69. В таблице 1 приведены примеры средств останова, используемых в различных типах реакторов, иллюстрирующие их разнообразие.

ТАБЛИЦА 1. СРЕДСТВА ОСТАНОВА

Тип реактора	Система быстрого останова	Разнообразные системы останова
BWR	B_4C в стальных трубах/пластины Hf	Борный раствор, инжектируемый в замедлитель/теплоноситель
PWR	Ag-In-Cd в стальных трубах/ B_4C в стальных трубах	Бор, инжектируемый в замедлитель/теплоноситель
PHWR	Кадмий, помещенный послойно в стальные трубы	Гадолиний, инжектируемый в замедлитель; сброс замедлителя; жидкий поглотитель в трубах
PHWR (корпусного типа)	Hf и стальные стержни в направляющих трубах из циркониевого сплава	Бор, инжектируемый в замедлитель

Надежность

3.70. Высокую надежность останова следует достигать путем сочетания таких мер, как:

- (a) Применение как можно более простых систем.
- (b) Использование, насколько это практически возможно, отказобезопасного проектирования⁶.
- (c) Рассмотрение возможных видов отказов и применения резервирования при запуске систем останова (например, датчиков или исполнительных устройств). Могут быть предусмотрены меры по обеспечению неодинаковости, например, путем использования, насколько это практически возможно, двух различных физических параметров срабатывания для каждой аварии.
- (d) Функциональная независимость и физическое разделение систем останова (включая разделение функций управления и останова), насколько это практически возможно, при задании вероятных видов отказов, включая отказ по общей причине.
- (e) Обеспечение легкого введения средств останова в активную зону с учетом влияния внутризонной среды при эксплуатационных и аварийных состояниях в пределах основы проекта.
- (f) Проектирование с целью облегчения технического обслуживания, инспекций в процессе эксплуатации и эксплуатационных испытаний.
- (g) Обеспечение средств для проведения всеобъемлющих испытаний при вводе в эксплуатацию и во время остановов для проведения технического обслуживания.
- (h) Проведение в ходе эксплуатации испытаний процесса срабатывания (или, если это возможно, частичного введения стержня);
- (i) отбор оборудования апробированной конструкции.

3.71. С целью количественного определения эффективности проектирования следует выполнить анализ надежности систем останова.

⁶ Наиболее простая общая форма проектирования для обеспечения отказоустойчивого останова предусматривает удерживание устройств для останова над активной зоной с помощью активных средств. При условии, что направляющие конструкции устройств для останова не заслонены чем-либо, эти устройства в случае отключения активных средств их удерживания (например, при прекращении протекания тока через удерживающийся электромагнит) упадут в активную зону под действием силы тяжести.

3.72. В качестве части анализа безопасности следует проводить оценку характеристик и надежности систем останова. Параллельно усилиям, направленным на повышение надежности системы быстрого останова до весьма высокого уровня, следует также проанализировать ожидаемые при эксплуатации переходные процессы без быстрого останова с целью подтверждения приемлемости последствий для топлива и границы давления и возможности длительного поддержания подкритического состояния⁷. Для конструкций, которые включают по меньшей мере две полностью функциональных, неодинаковых и независимых системы останова, эти события следует проанализировать с использованием предположения об отказе одной из систем быстрого останова.

Эффективность останова и поддержания в остановленном состоянии

3.73. Проектирование следует выполнять с таким расчетом, чтобы системы останова и поддержания в остановленном состоянии обеспечивали возможность перевода реактора в подкритический режим и поддержания его в этом режиме с достаточным запасом даже в условиях наибольшей реактивности активной зоны. Это следует предусмотреть для всего диапазона условий эксплуатации и конфигураций активной зоны, которые могут возникать во время предполагаемого цикла эксплуатации, ожидаемых при эксплуатации событий и проектных аварий. Это следует продемонстрировать:

- при проектировании с помощью расчетов;
- при вводе в эксплуатацию и сразу же после перегрузки топлива, путем проведения соответствующих нейтронно-физических и технологических измерений с целью подтверждения расчетов для данной загрузки активной зоны;
- во время эксплуатации реактора путем проведения измерений и расчетов, учитывающих существующие и ожидаемые условия в активной зоне реактора.

3.74. В этих анализах следует рассмотреть состояния наибольшей реактивности активной зоны, сделав предположение об отказе устройств(а) для останова, как изложено в пункте 3.62. Кроме того, следует обеспечить дальнейшее поддержание реактора в подкритическом состоянии при возникновении в

⁷ В некоторых государствах анализа ожидаемых при эксплуатации переходных процессов без быстрого останова не требуется, если предусмотрены две неодинаковых и независимых системы останова, каждая из которых способна быстро перевести ядерный реактор в подкритический режим из всех эксплуатационных состояний и аварийных условий в пределах основы проекта.

системе останова единичного случайного отказа. В получаемом запасе подкритичности следует учитывать неопределенности в расчетах, возможные отклонения загрузки активной зоны во время перегрузки топлива и имеющиеся диапазоны мониторинга и связанные с ними неопределенности. Необходимое абсолютное значение запаса устойчивости может зависеть от конструкции активной зоны реактора и от того, каким образом демонстрируется безопасность.

3.75. Количество и реактивную способность стержней останова, необходимых в системах, в значительной мере определяют указанные ниже факторы, которые следует учитывать все без исключения:

- (a) Размер активной зоны.
- (b) Тип топлива и схема загрузки активной зоны.
- (c) Требуемый запас подкритичности.
- (d) Предположение об отказе устройств(а) останова, как изложено в пункте 3.61.
- (e) Погрешности, связанные с расчетами. Они могут быть оценены путем сравнения результатов расчетов с результатами измерений, проведенных на экспериментальных и прототипных реакторах и во время ввода в эксплуатацию реактора.
- (f) Эффект 'экранирования' устройств останова. Общая реактивная способность устройств останова является функцией расстояния между этими устройствами, а также их мест нахождения в реакторе. Когда два устройства расположены близко друг к другу, их суммарная эффективность меньше, чем сумма их индивидуальных эффективностей.
- (g) Состояния наибольшей реактивности активной зоны после останова. Они зависят от ряда таких параметров, как:
 - конфигурация активной зоны, обладающая наибольшей реактивностью (и в надлежащих случаях соответствующая концентрация бора), которая возникнет в течение предусматриваемого топливного цикла, включая перегрузку топлива;
 - возможное сочетание температур топлива и замедлителя, приводящее к наибольшей реактивности;
 - количество введенной положительной реактивности, приводящее к условиям проектной аварии;
 - изменение содержания ксенона со временем после останова;
 - выгорание поглотителя.

Скорость останова

3.76. Следует обеспечивать скорость останова, позволяющую переводить реактор в достаточно подкритическое состояние без превышения установленных проектных пределов для топлива и границы давления.

3.77. При проектировании скорости останова следует принимать во внимание время срабатывания систем управления защитными действиями и связанных с ними исполнительных систем безопасности (средств останова).

3.78. При оценке скорости останова следует учитывать указанные ниже факторы:

- (a) Время срабатывания контрольно-измерительных приборов при инициировании процесса останова.
- (b) Время срабатывания исполнительного механизма средств остановки.
- (c) Расположение устройств останова, соответствующих различным конструкциям активной зоны реактора. Скорость останова зависит от:
 - расстояния между устройствами останова и активной частью активной зоны до их введения в зону;
 - расположения сопел для инъекции растворимого поглотителя, которое следует сделать таким, что, поглотитель мог быстро рассеяться в активной части активной зоны.
- (d) Легкость введения устройств останова в активную зону. Это может быть достигнуто путем использования направляющих труб или других конструктивных элементов, облегчающих введение устройств, и возможного использования гибких соединительных муфт для уменьшения жесткости устройств по их длине.
- (e) Скорость введения устройств останова. Требуемой скорости введения можно добиться одним или несколькими следующими способами:
 - падением устройства останова в активную зону под действием силы тяжести;
 - использованием гидравлических или пневматических приводов высокого давления для введения стержней останова в активную зону;
 - инъекцией растворимого поглотителя нейтронов с помощью гидравлических или пневматических систем.

3.79. Следует предусмотреть средства проверки скорости введения устройств останова. Следует регулярно проверять время введения.

Влияние окружающей среды

3.80. При проектировании систем останова следует учитывать следующие эффекты, связанные с влиянием окружающей среды в реакторе:

- (a) *Радиационные эффекты.* Обеднение поглотителя (например, бора) и распухание и нагревание материалов вследствие поглощения нейтронного и гамма-излучения.
- (b) *Химические эффекты.* Такие химические эффекты, как коррозия устройств останова. Следует также рассмотреть перемещение активированных продуктов коррозии в системе теплоносителя реактора и системе замедлителя.
- (c) *Изменения размеров конструкций.* Следует обеспечивать, чтобы изменения размеров и перемещения внутренних конструкций активной зоны вследствие изменений температуры, эффектов облучения или внешних событий, таких как землетрясения, не препятствовали введению устройств останова.

АКТИВНАЯ ЗОНА РЕАКТОРА И СВЯЗАННЫЕ С НЕЙ КОНСТРУКЦИИ

3.81. В этом разделе рассматриваются конструкции, которые образуют и поддерживают узел активной зоны реактора и которые являются наиболее важным фактором в обеспечении функционирования и безопасности активной зоны реактора.

3.82. К возможным механизмам повреждения активной зоны и связанных с ней конструкций, которые следует учитывать при проектировании, относятся: вибрация, как передаваемая через конструкции, так и вызываемая потоком теплоносителя; усталость; другие механические эффекты, такие как воздействие внутренних летящих предметов; тепловые, химические, гидравлические эффекты и эффекты облучения; и сейсмические перемещения. Особое значение имеют: повреждение систем останова и поддержания в остановленном состоянии; недостаточный теплоотвод от топлива; повреждение топлива; и повреждение границы давления первого контура. Следует также учитывать влияние высокого давления, высоких температур, колебаний температуры и распределения температуры, коррозии, коэффициентов поглощения излучения и доз облучения за время срока службы на физические размеры, механические нагрузки и свойства материалов.

3.83. Следует рассчитать ожидаемый радиационный нагрев конструкций и обеспечить надлежащее их охлаждение. Следует предусмотреть соответствующие запасы безопасности на случай тепловых нагрузок, возникающих в эксплуатационных состояниях и при проектных авариях. Следует рассмотреть химическое воздействие теплоносителя и замедлителя на конструкции.

3.84. При проектировании следует предусмотреть средства для проведения требуемых инспекций компонентов активной зоны и связанных с ней конструкций.

Граница давления первого контура

3.85. Топливные сборки и другие компоненты активной зоны в PWR и BWR и в PHWR корпусного типа следует размещать таким образом, чтобы на границе давления первого контура (т.е. стенке корпуса ядерного реактора) обеспечивался низкий поток нейтронов. При необходимости следует предусмотреть мониторинг потока нейтронов в тех местах на границе давления первого контура, которые подвержены нейтронному охрупчиванию.

Опорные конструкции активной зоны реактора

3.86. Опорные конструкции активной зоны реактора состоят из труб, корзины активной зоны, опорных фиксаторов и других зависящих от конструкции активной зоны реактора элементов, которые удерживают опорные конструкции топливныхборок в требуемых геометрических положениях относительно границы давления первого контура. Эти опорные конструкции следует проектировать таким образом, чтобы они оставались неповрежденными и могли выполнять свои функции на протяжении всего срока службы реактора в эксплуатационных состояниях и при проектных авариях. Следует учитывать механические нагрузки, создаваемые гидравлическими силами и возникающие при штатной перегрузке топлива и при постулируемой нештатной перегрузке топлива. Следует также принимать во внимание сейсмические нагрузки.

Опорные конструкции топливныхборок

3.87. Опорные конструкции топливныхборок следует проектировать таким образом, чтобы они обеспечивали сохранение нужной геометрии топливныхборок в эксплуатационных состояниях и при проектных авариях.

Направляющие конструкции для устройств останова и регулирования реактивности

3.88. Направляющие конструкции для устройств останова и регулирования реактивности следует проектировать таким образом, чтобы они выполняли требуемые функции в эксплуатационных состояниях и при проектных авариях.

3.89. Поскольку в PWR и BWR эти направляющие конструкции находятся в непосредственной близости от топливных сборок или топливных каналов, при проектировании следует соответствующим образом учитывать возможность их физического взаимодействия и повреждения во время эксплуатации и останова и при проектных авариях. Следует также рассмотреть возможность возникновения усталостных эффектов в результате воздействия мощных нейтронных потоков и/или нагревания при поглощении гамма-излучения. Если устройства останова и регулирования реактивности погружены в объем замедлителя (как например, в PHWR), то следует учитывать воздействие гидравлических сил на эти конструкции и обеспечивать, чтобы не превышались максимально допустимые деформации.

3.90. В проекте следует предусмотреть меры, облегчающие замену в необходимых случаях устройств регулирования реактивности и останова таким образом, чтобы при этом не происходило повреждения активной зоны реактора, неприемлемого повышения реактивности или чрезмерного радиационного облучения.

Опорные конструкции внутризонных контрольно-измерительных приборов

3.91. Конструкции и направляющие трубы с контрольно-измерительными приборами для обнаружения аварий и смягчения их последствий, находящиеся внутри активной зоны и в непосредственной близости от нее, следует проектировать так, чтобы они могли выполнять свои функции во всех эксплуатационных состояниях и при проектных авариях. Следует рассмотреть возможность того, что вызываемые потоком теплоносителя вибрации этих конструкций и направляющих труб могут привести к фреттинг-коррозии и последующему отказу при длительной эксплуатации.

3.92. Конструкции и трубы следует проектировать таким образом, чтобы были точно определены места расположения контрольно-измерительных приборов и чтобы не произошло их перемещения в результате непреднамеренных действий оператора, воздействия нагрузок от оборудования, усилий, создаваемых

потоком теплоносителя, или перемещений массы замедлителя в эксплуатационных состояниях или при проектных авариях. При необходимости в проекте следует предусмотреть средства, облегчающие замену контрольно-измерительных приборов.

Другие внутрикорпусные устройства корпуса ядерного реактора

3.93. В зависимости от типа реактора внутри корпуса реактора могут находиться различные другие конструкции. В их число входят разбрызгиватели питательной воды, сепараторы пара, устройства для осушки пара, корзина активной зоны, отражатели и тепловые экраны. В функции этих внутрикорпусных устройств входят распределение потока теплоносителя реактора, осушение пара, защита корпуса реактора от нагрева гамма-излучением и от воздействия нейтронного потока. Эти конструкции следует проектировать таким образом, чтобы их механическое срабатывание не ставило под угрозу выполнение любых связанных с ними функций безопасности в течение всего срока эксплуатации.

УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ

3.94. Цель управления активной зоной состоит в обеспечении выполнения требований в отношении безопасности активной зоны реактора и экономичного использования ядерного топлива [10].

3.95. Следует выбирать топливный цикл с соответствующими уровнями обогащения и надлежащими средствами регулирования реактивности активной зоны и распределения мощности, с тем чтобы можно было извлекать энергию из топлива наиболее экономичным образом в рамках ограничений, связанных с обеспечением безопасности. Сведения о различных средствах, имеющихся в распоряжении для достижения этой цели при управлении активной зоной, приведены в Дополнении III к настоящему руководству по безопасности.

Ограничения, связанные с обеспечением безопасности

3.96. При проектировании управления активной зоной следует принимать во внимание установленные для нормальной эксплуатации проектные пределы.

3.97. Для эксплуатационных состояний цель состоит в том, что не следует допускать повреждений оболочки твэлов. Однако существуют определенные условия (например, заводские дефекты твэлов, износ вследствие фреттинг-

коррозии, вызываемой обломками, или непредвиденные переходные процессы в эксплуатационных состояниях), которые могут сделать достижение этой цели безотказности чрезвычайно трудным. На практике в эксплуатационных состояниях может допускаться повреждение оболочек нескольких твэлов, поскольку концентрация радиоактивного материала в системах теплоносителя реактора может быть снижена за счет функции очистки теплоносителя реактора. В проекте следует предусматривать средства очистки теплоносителя реактора и другие необходимые средства, тем чтобы обеспечить удержание выбросов радиоактивного материала в окружающую среду в рамках установленных пределов.

3.98. Для условий проектной аварии допустимая степень повреждения топлива зависит от вероятности возникновения подобных условий и ожидаемых радиологических последствий. С целью ограничения количества допустимых повреждений топлива в условиях проектной аварии следует устанавливать более жесткие эксплуатационные пределы для топлива, чем те, которые определяются требованиями при нормальной эксплуатации. Это может быть, например, поддержание достаточно высоких значений минимального коэффициента запаса до кризиса кипения (в PWR) или минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена (в BWR) при нормальной эксплуатации, с тем чтобы не допустить осушения оболочки твэла во время ожидаемых при эксплуатации событий. В PWR следует устанавливать эксплуатационные пределы для топлива, которые в сочетании с функционированием систем безопасности ограничивают максимальную температуру и окисление топлива, а также максимальную скорость изменения энерговыделения, с тем чтобы предотвратить отказ оболочки.

Проектная информация по эксплуатации реактора

3.99. Для достижения желаемой реактивности активной зоны и распределения мощности при эксплуатации реактора, в рамках программы управления активной зоной следует предоставлять эксплуатирующей организации следующую информацию:

- картограмму топливных сборок в каждом топливном цикле;
- график последующей выгрузки и загрузки топливных сборок;
- конфигурации устройств регулирования реактивности и останова;
- график перестановки топливных сборок;
- сведения о выгорающих поглотителях и других компонентах активной зоны, которые должны быть удалены, введены или отрегулированы.

Дополнительные руководящие материалы по обращению с топливом приведены в [10].

Расчетный анализ активной зоны реактора

3.100. Во многих случаях такие параметры безопасности, как температура топлива и оболочки и пиковая линейная тепловая мощность, не могут быть измерены непосредственно, а их значения не могут быть представлены операторам реактора. Поэтому следует проводить расчетный анализ состояний активной зоны реактора, с тем чтобы задать значения таких параметров в эксплуатационных процедурах. Следует предусмотреть надлежащую контрольно-измерительную аппаратуру, позволяющую проверять результаты анализа путем измерений.

3.101. Аналитические методы и соответствующие компьютерные программы следует подвергать проверке и подтверждать их пригодность путем сравнения с одним или несколькими результатами, полученными с помощью:

- измерений, проведенных на экспериментальных реакторах;
- измерений, проведенных на прототипных реакторах;
- внутриреакторных измерений топливных элементов и сборок в смоделированных условиях;
- данных по эксплуатации активных зон аналогичной конструкции;
- измерений, проведенных во время ввода в эксплуатацию;
- измерений, проведенных в период эксплуатации реакторов: на различных уровнях мощности после каждой перегрузки топлива и в разное время в течение цикла;
- измерений, проведенных на топливных элементах и сборках после облучения с целью оценки тонкой структуры и эффектов выгорания;
- контрольных расчетов, сделанных с помощью других аттестованных компьютерных кодов.

3.102. В течение всего срока службы реактора следует периодически проводить анализ активной зоны реактора с целью обеспечения того, что эксплуатационная стратегия и ограничения по эксплуатации не приводят к нарушению проектных пределов.

3.103. При анализе следует рассматривать типичные случаи во всем рабочем цикле для следующих режимов работы активной зоны реактора:

- режим полной мощности, включая характерное энергораспределение;

- следование за нагрузкой;
- выход на критичность и работа на мощности;
- маневрирование мощностью;
- пуск;
- перегрузка топлива;
- останов;
- ожидаемые при эксплуатации события;
- эксплуатация на границе термогидравлической устойчивости для BWR.

При изменении операций по обращению с топливом в активной зоне или любых характеристик топливных элементов (таких как обогащение топлива или материал оболочки твэлов) анализ следует обновлять.

3.104. Для определения пиковой мощности канала и пиковой линейной мощности в нормальном режиме эксплуатации на полной мощности следует рассчитать стационарные распределения мощности для каждого места нахождения сборки и в аксиальном направлении по длине топливных сборок. Следует ввести поправку на влияние изменений геометрии сборки на нейтронно-физические и термогидравлические эффекты (например, изменения толщины замедлителя вследствие прогиба сборки). Для определения точек перегрева оболочки следует совместно учесть радиальное энергораспределение внутри топливной сборки и осевые изменения энерговыделения, вызываемые распорками, решетками и другими компонентами.

3.105. Прогнозирование распределений мощности и температуры в течение всего срока службы топливного элемента следует осуществлять с помощью методов, упомянутых в пункте 3.104, с тем чтобы оценить поведение топлива в активной зоне и продемонстрировать сохранение герметичности топливных элементов.

3.106. В случае загрузки в активную зону топливных сборок разных типов (так называемая смешанная активная зона) следует проанализировать их механическую и термогидравлическую совместимость (например, в терминах характеристик перепада давления на топливных сборках), а также их совместимость в смысле ядерных характеристик активной зоны.

3.107. В надлежащих случаях следует сопоставить влияние таких эксплуатационных режимов, как следование за нагрузкой, циклическое изменение мощности, пуск реактора и перегрузка топлива с хронологией изменения мощности и температуры, с тем чтобы оценить такие результаты воздействия

циклической тепловой нагрузки, как повышение давления газообразных продуктов деления и усталость оболочки твэла.

Перегрузка топлива

3.108. Дополнительная информация относительно систем для обращения с топливом и для его хранения приводится в [3, 10].

3.109. При перегрузке топлива на мощности следует поддерживать герметичность границы давления системы теплоносителя реактора. Следует обеспечивать, чтобы влияние операций по перегрузке топлива на нейтронно-физические характеристики активной зоны не превышало возможностей систем управления реактора.

3.110. Для обеспечения того, чтобы топливные сборки загружались в отведенные для них места в активной зоне, могут использоваться меры административного контроля. С этой целью могут быть рассмотрены следующие меры:

- использование мониторов реактивности для проверки соответствия уровня обогащения топливных сборок предъявляемым требованиям (PWR и BWR);
- механические средства для предотвращения непреднамеренной загрузки топливных сборок (PWR и BWR).

В мерах административного контроля на PWR с перегрузкой топлива на мощности обычно указывается, что не следует производить перегрузку топлива в то время, когда реактор остановлен, что является дополнительной мерой защиты от непреднамеренного достижения критичности во время перегрузки топлива.

3.111. Окончательная проверка картограммы загружаемого топлива может быть осуществлена с помощью измерений распределения потока в активной зоне.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

3.112. Для контроля таких параметров активной зоны, как ее мощность (уровень, энергораспределение и колебания мощности во времени), состояние и физические свойства теплоносителя и замедлителя (расход, температура) и ожидаемая эффективность средств останова реактора (например, степень

введения поглощающих устройств по сравнению с их пределами введения) следует предусмотреть контрольно-измерительные приборы, с тем чтобы можно было предпринимать любые необходимые корректирующие действия. Кроме того, с целью проверки того, что не превышены проектные пределы, следует контролировать уровни активности в теплоносителе. Для обеспечения необходимого изменения параметров активной зоны и поддержания их в пределах определенных рабочих диапазонов могут использоваться системы управления. В зависимости от скорости изменения параметра, срабатывание систем контроля может быть автоматическим или ручным.

3.113. Выбор контролируемых параметров будет зависеть от типа реактора.

3.114. В реакторах с перегрузкой на мощности применение системы, определяющей местонахождение поврежденной топливной сборки, может облегчить удаление дефектной топливной сборки и тем самым способствовать поддержанию низких уровней активности в теплоносителе.

3.115. Следует обеспечивать, чтобы точность, время срабатывания, диапазон и надежность всех систем контроля были достаточны для выполнения предписанных им функций (см. [9]). В проекте следует предусмотреть непрерывные или периодические испытания систем контроля.

3.116. Руководящие материалы по послеаварийному мониторингу приведены в [9]. Если мониторинг активной зоны требуется в аварийных условиях в пределах основы проекта, то следует предусмотреть, чтобы контрольно-измерительные приборы были аттестованы для работы в условиях окружающей среды, ожидаемых после аварии.

3.117. Пространственное энергораспределение следует контролировать посредством находящихся вне или внутри активной зоны контрольно-измерительных приборов (таких, как нейтронные детекторы и гамма-термометры). Для обеспечения достаточных запасов безопасности следует проводить измерения локальной мощности в различных точках активной зоны. Следует регулярно контролировать распределение потока в активной зоне. Детекторы следует расположить в активной зоне таким образом, чтобы обеспечить надежное детектирование локальных изменений удельного энерговыделения. Как находящиеся вне активной зоны, так и внутризонные нейтронные детекторы следует подвергать периодической калибровке. (Эти рекомендации применимы в отношении PWR, BWR и PHWR.)

3.118. Ниже приведены примеры параметров, подлежащих измерению для целей контроля активной зоны:

- нейтронный поток;
- температура теплоносителя;
- расход теплоносителя;
- уровень воды;
- давление в системе;
- активность теплоносителя;
- положения вводимых регулирующих стержней;
- концентрация растворимого бора (для PWR).

Для целей безопасности такие параметры могут контролироваться, если возможно, в различных местах.

3.119. Другие связанные с безопасностью параметры могут быть определены на основе измеренных параметров, например:

- время удвоения нейтронного потока;
- скорость изменения нейтронного потока;
- осевая и радиальная неустойчивости нейтронного потока;
- баланс реактивности;
- термогидравлические параметры активной зоны (например, коэффициент запаса до кризиса кипения или коэффициент запаса до кризиса теплообмена).

3.120. В период останова реактора следует обеспечивать работоспособность минимального комплекса приборов (т.е. детекторов нейтронного потока с достаточной чувствительностью). Для обеспечения безопасного реагирования после непреднамеренного возникновения критичности следует обеспечивать эксплуатационную готовность по меньшей мере одного средства останова.

3.121. В некоторых реакторах во время пуска реактора с целью использования наиболее подходящих мониторов для регистрации конкретных диапазонов интенсивности потока и исключения случайных аварийных остановов используют комбинацию блокировок систем регистрации потока и устройств регулирования реактивности. Следует обеспечивать совместимость конструкции таких систем блокировки с конструкцией системы аварийной защиты реактора.

3.122. Нейтронный поток во время пуска и особенно во время первого пуска весьма мал по сравнению с нейтронным потоком при эксплуатации на полной мощности, и поэтому для его контроля могут временно потребоваться более чувствительные нейтронные детекторы. Может также потребоваться источник нейтронов для повышения интенсивности потока до уровня в пределах диапазона чувствительности мониторов нейтронного потока при пуске. При проектировании нейтронных источников следует обеспечивать, чтобы:

- эти источники функционировали надлежащим образом в течение запланированного срока службы,
- эти источники были совместимы с топливными сборками и опорными конструкциями топливных сборок.

3.123. Полезную информацию о незакрепленных частях или начальных стадиях механических отказов компонентов активной зоны или внутриреакторных конструкций, или о неисправностях измерительного оборудования может дать анализ нейтронных и акустических шумов.

3.124. Для обеспечения того, чтобы состояние активной зоны оставалось в рамках эксплуатационных пределов, принятых при анализе безопасности, может использоваться компьютеризованная система контроля активной зоны. В тех случаях, когда она сопряжена с системой аварийной защиты, следует предусматривать аттестацию этой системы (см. [9]).

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ

3.125. Постулируемые исходные события (в том числе вероятные сочетания событий, таких как отказ оборудования, ошибки оператора и внешние природные явления и вызываемые деятельностью человека события) следует проанализировать в соответствии с [11].

Постулируемые исходные события

3.126. Постулируемые исходные события и последовательности событий различны для разных конструкций активной зоны реактора; реакция активной зоны реактора на эти события также сильно различается в зависимости от коэффициентов реактивности (см. Дополнение I) и задействованных систем.

Методы анализа

3.127. Следует обеспечивать соответствие установленных при проектировании активной зоны пределов для различных последовательностей исходных событий вероятности возникновения каждого события и связанных с ним радиологических последствий. При оценках с целью определения того, что результирующие состояния топлива не выходят за рамки допустимых пределов, следует использовать либо консервативный подход к соответствующим параметрам, либо реалистичный (основанный на наилучшей оценке) подход, который включает оценку неопределенностей. При анализе на основе наилучшей оценки обычно исследуют чувствительность результатов к изменениям соответствующих параметров.

3.128. Следует обеспечивать, чтобы все компьютерные программы, используемые при анализе безопасности, были проверены и обоснованы. Следует обеспечивать, чтобы методы и/или модели, используемые в компьютерной программе для расчетов, подходили для данной цели. (Дополнительные руководящие материалы см. в разделе «Оценка использованных компьютерных кодов», [11].)

3.129. Что касается результатов расчетов, проведенных с использованием компьютерных кодов, то следует подтвердить, что пригодность прогнозных данных кодов была обоснована надлежащим образом, то есть путем сравнения с экспериментальными данными или с контрольными расчетами, выполненными с помощью других обоснованных кодов, или путем комбинированного применения обоих этих подходов.

3.130. Следует провести детальный анализ активной зоны, включая анализ нейтронно-физических, термогидравлических и механических параметров.

3.131. При детальном анализе активной зоны следует учитывать следующие основные факторы:

- эксплуатационное состояние (например, термогидравлические условия: подкритический режим, режим с частичной нагрузкой, с полной нагрузкой, динамика изменения содержания ксенона);
- температурный коэффициент реактивности топлива;
- температурные коэффициенты реактивности теплоносителя и замедлителя;
- пустотные коэффициенты реактивности теплоносителя и замедлителя;

- скорость изменения концентрации растворимого поглотителя в замедлителе и теплоносителе;
- скорость введения положительной реактивности вследствие срабатывания устройства регулирования реактивности или изменений технологических параметров;
- скорость введения отрицательной реактивности, связанная с быстрой остановкой реактора;
- индивидуальная переходная характеристика канала при средней тепловой мощности активной зоны;
- рабочие характеристики оборудования системы безопасности, включая переключение с одного режима работы на другой (например, с режима инжектирования при аварийном охлаждении активной зоны к режиму рециркуляции);
- учет распада ксенона и других поглотителей нейтронов при анализе долгосрочных характеристик активной зоны.

3.132. Области неопределенностей следует рассматривать, делая при анализе консервативные допущения или добавляя к используемым входным параметрам запас для учета неопределенностей. Эти неопределенности имеют как случайную, так и систематическую компоненты, связанные со статистическими и физическими неопределенностями. Систематические неопределенности следует учитывать при анализе в качестве смещения; случайные неопределенности могут быть объединены статистически.

3.133. Анализ безопасности активной зоны используется для подтверждения того, что не превышены установленные пределы для топлива. При анализе следует учитывать влияние на охлаждение активной зоны таких факторов, как вздутие и разрыв топливной оболочки, экзотермические реакции “металл-вода” и деформации топливных элементов. Образование водорода в результате реакции “металл-вода” может угрожать целостности защитной оболочки и поэтому его следует также учитывать (см. [12]).

3.134. Результаты анализа могут приводить к эксплуатационным ограничениям, вводимым с целью соблюдения проектных пределов для топлива.

3.135. Следует провести определение и ранжирование ключевых физических явлений и систем, которые определяют ответную реакцию станции. Эту информацию можно использовать для оценки возможностей моделирования с использованием соответствующих компьютерных кодов.

4. АТТЕСТАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

4.1. Связанные с обеспечением безопасности соображения при проектировании активной зоны следует принимать во внимание в течение всего срока службы конструкций, систем и элементов активной зоны. Ниже обсуждены соответствующие рекомендации.

АТТЕСТАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

4.2. Следует обеспечивать, чтобы аттестационная программа подтверждала способность оборудования активной зоны реактора выполнять свою функцию в течение соответствующего интервала времени и с учетом соответствующих функциональных и связанных с обеспечением безопасности соображений в заданных внешних условиях (например, условиях давления, температуры, уровней излучения, механических нагрузок и вибрации). Следует предусмотреть, чтобы эти внешние условия включали изменения, ожидаемые при нормальной эксплуатации, ожидаемых при эксплуатации событиях и проектных авариях.

4.3. Характеристики некоторых постулируемых исходных событий могут исключать возможность проведения реалистичных пусковых и периодических испытаний, которые могли бы подтвердить, что оборудование будет выполнять свою функцию безопасности, когда это необходимо, например, во время землетрясения. Для соответствующего оборудования в период до его монтажа следует запланировать и осуществить надлежащую аттестационную программу.

4.4. Методы аттестации могут предусматривать:

- (a) проведение типовых испытаний оборудования, являющегося репрезентативным для того оборудования, которое должно быть поставлено;
- (b) проведение испытаний поставленного оборудования;
- (c) использование соответствующего накопленного опыта;
- (d) анализ, основанный на имеющихся и применимых результатах испытаний;
- (e) любое сочетание вышеупомянутых методов.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИНСПЕКЦИЙ И ИСПЫТАНИЙ

4.5. Как указано в пункте 2.9, при проектировании и компоновке конструкций, систем и элементов активной зоны реактора требуется принимать меры, обеспечивающие, чтобы дозы излучения, получаемые населением и персоналом на площадке во всех эксплуатационных состояниях, включая техническое обслуживание, испытания и инспекции и снятие с эксплуатации, не превышали разрешенных пределов и сохранялись на разумно достижимом низком уровне [1, 5–7].

4.6. При проектировании следует предусмотреть проведение испытаний и инспекций во время эксплуатации с целью обеспечения того, чтобы активная зона и связанные с ней конструкции и системы регулирования реактивности и остановки выполняли предписанные функции в течение всего срока службы. Дополнительные руководящие материалы по проведению инспекций во время эксплуатации содержатся в [13].

4.7. Следует разработать систему, обеспечивающую идентификацию каждой сборки, а также ее ориентацию в активной зоне. Следует также предусмотреть возможность инспектирования каждой топливной сборки до и после облучения с целью обнаружения любого возможного повреждения.

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

5.1. Следует обеспечивать высокое качество проектирования и изготовления топлива и компонентов активной зоны посредством разработки и применения приемлемых процедур обеспечения качества (см. также [14])⁸.

⁸ МАГАТЭ проводит работу по пересмотру требований и руководящих материалов в тематической области обеспечения качества, установленных в Серии изданий по безопасности No 50-C/SG-Q (1996) в новых нормах безопасности по системам управления для обеспечения безопасности ядерных установок и деятельности, связанной с использованием ионизирующего излучения. Термин 'система управления' был принят в пересмотренных нормах вместо терминов 'обеспечение качества' и 'программа обеспечения качества'. В новых нормах будут объединены в одну согласованную систему все аспекты управления ядерной установкой, включая требования безопасности, охраны здоровья, окружающей среды и требования к качеству.

5.2. При разработке и оценке компьютерных кодов и связанных с ними методов анализа безопасности следует уделять большое внимание вопросам обеспечения качества.

Дополнение I

КОЭФФИЦИЕНТЫ РЕАКТИВНОСТИ

I.1. Одной из важных характеристик поведения активной зоны реактора в любом переходном режиме является скорость протекания переходного процесса. Эта скорость зависит от комбинированного влияния ядерных характеристик активной зоны, которые рассматриваются в настоящем дополнении. К наиболее важным факторам относятся:

- температурный коэффициент реактивности топлива;
- температурный коэффициент реактивности теплоносителя;
- температурный коэффициент реактивности замедлителя;
- плотностной коэффициент реактивности теплоносителя;
- доля запаздывающих нейтронов;
- время жизни мгновенных нейтронов;
- влияние перераспределения энерговыделения на реактивность (например, эффективность компенсации ксенонового отравления и плотность замедлителя).

В PWR и BWR функции теплоносителя и замедлителя выполняет одна и та же среда и поэтому соответствующие коэффициенты реактивности одинаковы.

I.2. Мощностной коэффициент реактивности обычно используют для того, чтобы определить изменение реактивности при единичном изменении мощности.

I.3. Ядерные характеристики активной зоны определяют внутренне присущие эффекты обратной связи, влияющие на реактивность при росте мощности вследствие повышения температуры топлива, теплоносителя и замедлителя.

I.4. Ввиду увеличения сечения резонансного поглощения нейтронов ^{238}U с температурой (эффекта Доплера), температурный коэффициент топлива обычно отрицателен.

I.5. В реакторах, использующих растворимый бор в замедлителе-теплоносителе, температурный коэффициент реактивности замедлителя-теплоносителя определяется влиянием концентрации бора. При высоких концентрациях бора этот коэффициент достигает положительных значений. Однако небольшие положительные значения температурного коэффициента реактивности замедлителя-теплоносителя приемлемы, если общее воздействие обратной

связи на реактивность с температурой достаточно отрицательно для того, чтобы ограничить рост мощности приемлемыми значениями. Отрицательный температурный коэффициент реактивности замедлителя-теплоносителя в диапазоне мощностей может быть достигнут путем снижения концентрации бора, в случае необходимости, путем использования фиксированного или отдельного выгорающего поглотителя и/или введения устройств регулирования⁹.

I.6. Поведение активной зоны при переходных процессах зависит от типа и конструкции реактора и поэтому знаки различных коэффициентов реактивности изменяются от одного типа реактора к другому. Таблица 2 иллюстрирует эти изменения.

ТАБЛИЦА 2. КОЭФФИЦИЕНТЫ РЕАКТИВНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА МОЩНОСТИ

Параметр	Коэффициент реактивности			
	PWR	BWR	HWR	
			Канального типа	Корпусного типа
Температура теплоносителя	–	–	+	+
Плотность теплоносителя ¹⁰	+	+	–	–
Температура замедлителя	–	–	~0 ¹¹	–
Температура топлива	–	–	–	–
Мощность	–	–	~0 ¹¹	~0 ¹¹

Примечание: При росте соответствующего параметра в режиме работы на мощности реактивность возрастает (+) или снижается (–).

⁹ В некоторых типах реакторов замедлитель и теплоноситель разделены так, что уменьшение плотности теплоносителя за счет пустотного эффекта может приводить к эффекту положительной реактивности.

¹⁰ Для BWR плотностной коэффициент реактивности теплоносителя выражен через пустотный коэффициент реактивности.

¹¹ В нескольких государствах в PWR допускаются небольшие положительные значения температурного коэффициента реактивности замедлителя и/или теплоносителя.

Дополнение II

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ “ТОПЛИВНАЯ ТАБЛЕТКА-ОБОЛОЧКА”

II.1. Следует принимать во внимание взаимодействие “топливная таблетка-оболочка”, представляющее собой коррозионное растрескивание под действием механических напряжений, которое возникает при расширении топливной таблетки и ее механическом воздействии на оболочку в присутствии корродирующего агента.

II.2. Коррозионное растрескивание оболочки под действием механических напряжений может возникать в результате одновременного наличия следующих факторов:

- значительных растягивающих напряжений, равномерных или локальных, которые, возможно, вызываются растрескиванием таблетки по мере ее расширения;
- определенной концентрации коррозионных веществ, таких как йод, кадмий, цезий или другие продукты деления;
- длительного облучения.

II.3. Повреждение топлива может возникать в тех случаях, когда в условиях длительного облучения происходит быстрый рост энерговыделения в топливе и достигаются высокие уровни мощности. Это происходит потому, что значительные растягивающие напряжения, возникающие в оболочке из-за расширения таблеток, могут приводить к растрескиванию оболочки, которая уже подверглась коррозии.

II.4. Можно рассмотреть несколько способов ограничения повреждений, вызываемых коррозионным растрескиванием под действием механических напряжений. Например:

- растягивающие напряжения могут быть уменьшены с помощью других средств, таких как ограничение скорости изменения мощности или создание в топливном элементе начального внутреннего давления;
- между оболочкой и продуктами деления можно поместить разделительный барьер;
- продукты деления могут быть иммобилизованы путем введения добавки;
- локальную неравномерность энерговыделения можно уменьшить путем правильного общего проектирования активной зоны.

II.5. Существует обширная база данных по опыту эксплуатации, прототипным испытаниям и внеакторным испытаниям. Однако явление коррозионного растрескивания под напряжением понято лишь частично. Поэтому в настоящее время при проектировании топливных элементов требуются всеобъемлющая оценка и использование имеющихся данных или результатов испытаний на прототипном топливе для подтверждения того, что конструкция топлива и соответствующие эксплуатационные пределы достаточны для предотвращения отказов, вызываемых коррозионным растрескиванием под напряжением.

Дополнение III

СООБРАЖЕНИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

III.1. Топливный цикл, принятый для конкретного типа реакторов, допускает, в рамках соответствующих проектных ограничений, многочисленные варианты наиболее эффективного использования топлива. Следует принимать во внимание нижеуказанные параметры, касающиеся обращения с топливом:

- (1) *Формирование поля энерговыделения активной зоны в радиальном направлении.* Выравнивание радиального распределения мощности может быть достигнуто путем совместного применения следующих мер:
 - радиального распределения устройств регулирования реактивности;
 - относительного перемещения устройств регулирования реактивности;
 - изменения обогащения или глубины выгорания топлива по радиусу;
 - перестановкой топливных сборок в радиальном направлении в течение срока их службы в активной зоне;
 - радиального распределения топливныхборок, содержащих в топливе выгорающий поглотитель.
- (2) *Разброс мощности от сборки к сборке.* Такой разброс в значительной мере зависит от обогащения топлива в топливной сборке и от ее облучения. Его можно уменьшить с помощью следующих мер:
 - размещения внутри топливныхборок выгорающих поглотителей;
 - изменения в шахматном порядке обогащения топлива с учетом положений устройств регулирования реактивности;
 - выбора последовательности перегрузки топлива, в частности для реакторов с перегрузкой на мощности.
- (3) *Формирование поля энерговыделения в аксиальном направлении.* Хотя средства регулирования реактивности используются главным образом для регулирования реактивности активной зоны и радиального распределения мощности, в некоторых случаях они применяются для ограничения пикового значения аксиального распределения мощности или температуры оболочки. Для ограничения неравномерности энерговыделения в аксиальном направлении может использоваться изменение обогащения топлива или содержания выгорающих поглотителей по высоте. В PHWR используют также перегрузку топлива на мощности и регулирующие стержни.

- (4) *Разброс характеристик в пределах топливной сборки.* В пределах топливной сборки, для оптимизации колебаний номинальной мощности в течение срока службы сборки может использоваться изменение обогащения топлива или содержания выгорающего поглотителя.

ГЛУБИНА ВЫГОРАНИЯ ПРИ ВЫГРУЗКЕ ТОПЛИВА

III.2. В реакторах, работающих на обогащенном уране, максимальную глубину выгорания топлива при выгрузке выбирают на основе инженерно-технической оценки поведения топлива и целостности оболочки твэлов (см. Дополнение IV, пункты IV.2 и IV.3). Следует обеспечивать, чтобы эта оценка основывалась на опыте эксплуатации и на внутриреакторных и вне реакторных испытаниях.

III.3. В реакторах с перегрузкой на мощности, работающих на природном уране, максимальная глубина выгорания топлива при выгрузке обычно намного ниже, чем в реакторах, работающих на обогащенном уране.

ЗАПАС РЕАКТИВНОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

III.4. Запас реактивности активной зоны необходим для того, чтобы обеспечить возможность эксплуатации реактора до окончания топливного цикла и/или корректировки уровня мощности реактора в течение топливного цикла. В реакторах, работающих на обогащенном уране, обогащение топлива следует выбирать таким образом, чтобы активная зона имела достаточный запас реактивности, обеспечивающий непрерывную эксплуатацию на полной мощности в течение запланированного топливного цикла. В LWR для поглощения запаса реактивности используют бор; его концентрация может снижаться с целью контроля нестационарных процессов при отравлении ксеноном и восстановления уровней мощности активной зоны. В реакторах, работающих на природном уране, экономически нецелесообразно обеспечивать достаточный запас реактивности активной зоны для компенсации переотравления ксеноном во всех условиях. Поэтому на ограниченное время после остановки реактора вводят бустерные или компенсирующие стержни с целью компенсации переотравления ксеноном.

III.5. Первоначально активная зона реактора с перегрузкой на мощности, работающего на природном уране, имеет больший запас реактивности, чем равновесная активная зона. Этот запас реактивности может быть

скомпенсирован путем использования обедненного уранового топлива, бора или гадолиния, растворенного в замедлителе, или сочетания этих средств.

III.6. Для активных зон реакторов с обогащенным топливом, перегрузка которого производится партиями, следует определить состояние наибольшей реактивности активной зоны с учетом колебаний степени обогащения топлива и обеднения выгорающего поглотителя в активной зоне в течение топливного цикла.

III.7. Следует обеспечивать, чтобы управление активной зоной не оказывало отрицательного влияния на способность систем останова выполнять установленные для них функции безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

III.8. К ключевым параметрам, влияющим на проектирование активной зоны и стратегии обращения с топливом, относятся:

- в PWR и PHWR, температурные коэффициенты реактивности топлива и замедлителя, эффективность бора, запас устойчивости, максимальная скорость введения реактивности и реактивная способность, радиальный и аксиальный коэффициенты неравномерности энерговыделения, максимальное линейное энерговыделение и минимальный коэффициент запаса до кризиса кипения;
- в BWR, температурный коэффициент реактивности топлива, пустотный коэффициент реактивности, запас устойчивости, максимальная скорость введения реактивности и реактивная способность, максимальное линейное энерговыделение и минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена.

Дополнение IV

АКТИВНЫЕ ЗОНЫ С ГЛУБОКИМ ВЫГОРАНИЕМ ТОПЛИВА

IV.1. Экономическая оптимизация ядерного топливного цикла приводит к стратегиям управления активной зоной с повышенным выгоранием топлива. Диапазон глубокого выгорания может быть определен как уровень, превышающий 50 ГВт-сут/т – среднюю глубину выгорания выгружаемой топливной сборки. В Дополнении IV изложены аспекты проектирования активной зоны и поведения топливных элементов, имеющие отношение к режимам глубокого выгорания оксидного уранового топлива.

IV.2. При глубоком выгорании топлива увеличиваются изменения микроструктуры топливной таблетки и пористость на периферии таблетки. Эти явления, которые могут воздействовать на такие физические свойства таблетки, как удельная теплопроводность, точка плавления, плотность, удерживание газообразных продуктов деления и выход газообразных продуктов деления, следует принимать во внимание.

IV.3. Глубокое выгорание приводит также к увеличению толщины оксидного слоя оболочки и ее гидрированию, причем эти процессы происходят непрерывно во время облучения. В условиях сильного окисления может происходить скалывание оксидной пленки. Гидрирование приводит к изменению механических свойств оболочки. Скорость окисления и скорость гидрирования существенно зависят от материала оболочки, а также от процесса ее изготовления. Исследования новых сплавов направлены на улучшение поведения оболочки путем использования, например, материалов с низким содержанием олова, поверхностных слоев с низким содержанием олова или материалов, содержащих ниобий.

IV.4. Проектное обогащение свежего топлива в случае активной зоны для топлива с глубоким выгоранием выше, чем соответствующее обогащение топлива в традиционной активной зоне. Это повышенное обогащение увеличивает запас реактивности активной зоны и максимальную энтальпию теплоносителя в активной зоне, уменьшая таким образом запас до термогидравлических пределов параметров активной зоны. Увеличение количества выгорающего поглотителя является возможной мерой для компенсации высокого запаса реактивности активной зоны.

IV.5. Вследствие более продолжительных периодов облучения, при глубоком выгорании увеличивается выход газообразных продуктов деления, что

приводит к дополнительному нарастанию давления в топливном элементе. Этот рост давления может быть замедлен, если внутри топливного элемента предусмотрен достаточный газовый объем¹⁰.

IV.6. При проектировании активной зоны с глубоким выгоранием топлива следует принимать во внимание увеличение нагрузок на топливные сборки и их деформацию, которая может повлиять на легкость введения регулирующих стержней.

IV.7. Ввиду большего запаса реактивности активной зоны с глубоким выгоранием топлива, может потребоваться более высокая концентрация растворимого бора в теплоносителе. Такая повышенная концентрация может привести к проблемам, связанным с химическим составом теплоносителя, таким как повышенная коррозия в первом контуре. Для снижения концентрации растворимого бора может использоваться обогащенный ¹⁰B.

IV.8. При задании максимального уровня обогащения топлива следует предусматривать определенный запас с целью предотвращения возникновения критичности при хранении сухого топлива и при хранении топлива в бассейне.

IV.9. Изменения свойств топливных таблеток и оболочки в условиях глубокого выгорания топлива могут повлиять на поведение топливных элементов в аварийных условиях, таких как аварии, инициируемые внезапным ростом реактивности, или аварии с потерей теплоносителя.

IV.10. Для условий аварии, инициированной внезапным ростом реактивности, результаты недавних экспериментов указывают на снижение пределов повреждения топлива в терминах средней пиковой энтальпии или повышения энтальпии при условиях глубокого выгорания по сравнению со значениями для свежего топлива или топлива с низким выгоранием. Эти аналитические результаты еще не носят окончательного характера, поскольку экспериментальные программы еще не завершены. Особыми проблемами являются вклад выхода газообразных продуктов деления в набухание таблеток и возникновение динамической механической нагрузки оболочки при быстром импульсном росте энерговыделения, а также возможное охрупчивание материала оболочки.

¹⁰ Проводятся исследования возможных путей уменьшения выхода газообразных продуктов деления посредством изменения микроструктуры топлива.

IV.11. В условиях аварии с потерей теплоносителя деформацию топливных элементов и характер отказа вследствие воздействия тепловых нагрузок будут определять механические свойства материалов оболочки. Начато осуществление программ исследований по измерению этих механических параметров материалов оболочки в условиях окисления, наблюдаемых при эксплуатации.

Дополнение V

АКТИВНЫЕ ЗОНЫ СО СМЕШАННЫМ ОКСИДНЫМ ТОПЛИВОМ

V.1. При использовании в LWR смешанного оксидного топлива следует руководствоваться касающимися проектирования соображениями, изложенными в настоящем руководстве по безопасности для оксидного уранового топлива (UO_2 топлива), немного обогащенного ураном-235 (^{235}U). В Дополнении V кратко изложены соответствующие различия между этими двумя типами топлива с учетом того факта, что на практике реактивная способность сборок со смешанным оксидным топливом такова, что возможна та же длительность цикла, что и при загрузке активной зоны UO_2 .

V.2. Основные свойства смешанного оксидного топлива и UO_2 топлива, такие как плотность, удельная теплопроводность и удельная теплоемкость, различаются незначительно. Однако температура плавления смешанного оксидного топлива немного ниже, чем температура плавления UO_2 топлива.

V.3. Значения кинетических параметров смешанного оксидного топлива, а именно, суммарная доля запаздывающих нейтронов и время жизни мгновенных нейтронов, несколько ниже аналогичных значений для UO_2 топлива.

V.4. Для микроструктуры таблетки смешанного оксидного топлива характерны агломераты, содержащие плутоний, заключенный в матрице таблетки из оксида урана. Размер агломератов плутония зависит от конкретного процесса изготовления. Процессы ядерного деления в этих агломератах приводят к весьма глубокому локальному выгоранию и как следствие к изменениям микроструктуры и пористости в близлежащей области. В UO_2 топливе микроструктурные изменения при глубоком локальном выгорании начинаются на периферии таблетки, что приводит к так называемому краевому эффекту. Изменения микроструктуры влияют на физические свойства топливной таблетки и на характеристики удержания газообразных продуктов деления.

V.5. Было установлено, что в нормальных эксплуатационных условиях выход газообразных продуктов деления в UO_2 топливе и смешанном оксидном топливе зависит главным образом от предыстории энерговыделения в топливе. Для аварийных условий, таких как условия при аварии, инициированной мощным импульсным скачком реактивности, некоторые результаты испытаний указывают, что динамический выход газообразных продуктов деления может

приводить к более высоким интенсивностям выхода для смешанного оксидного топлива, чем для UO_2 топлива.

V.6. Локальная неравномерность энерговыделения в твэлах со смешанным оксидным топливом, находящихся в непосредственной близости от сборок с урановым топливом, является специфическим аспектом загрузок активной зоны с использованием топлива обоих типов. На такие твэлы со смешанным оксидным топливом оказывает влияние характерный энергетический спектр нейтронов топливной сборки с UO_2 , который располагается выше в диапазоне тепловых энергий, что приводит к высокой интенсивности деления в смешанном оксидном топливном элементе. Этот паразитный эффект может быть скомпенсирован путем уменьшения содержания делящегося Pu в периферийных топливных элементах сборки со смешанным оксидным топливом.

V.7. Для смешанного оксидного топлива эффективность воздействия на реактивность поглотителей тепловых нейтронов (например, поглотителей в регулирующих стержнях, твердого или растворимого бора и ксенона) оказывается более низкой по сравнению с соответствующей эффективностью для UO_2 топлива. Это снижение эффективности воздействия на реактивность является результатом сдвига энергетического спектра нейтронов в случае смешанного оксидного топлива в надтепловую область. В случае необходимости, для компенсации реактивности следует рассмотреть возможность использования более высокой концентрации бора или обогащенного ^{10}B или увеличения числа устройств регулирования реактивности.

V.8. На эффекты обратной связи по реактивности в смешанном оксидном топливе также оказывают влияние изменения энергетического спектра нейтронов, однако для активных зон с UO_2 топливом влияние обратной связи по реактивности на характер изменения реактивности активной зоны остается в пределах обычного диапазона изменений, являющихся следствием выгорания или изменений загрузки активной зоны.

V.9. Для определения характеристик смешанного оксидного топлива необходимо знать суммарное содержание плутония и детальный изотопный состав. Поскольку изотопный состав плутония сильно различается в зависимости от предыстории сборки с отработавшим топливом, из которой был извлечен плутоний, относительное содержание делящихся изотопов плутония также оказывается различным; это усложняет определение характеристик смешанного оксидного топлива. В этом заключается его отличие от UO_2 топлива, которое полностью характеризуется обогащением по ^{235}U .

V.10. Максимальное содержание плутония в топливе выбирают таким образом, чтобы характеристики реактивности всей активной зоны согласовались с максимальным обогащением UO_2 топлива. Следует обеспечивать, чтобы при максимальном содержании плутония сохранялся отрицательный пустотный коэффициент реактивности.

V.11. Одной из возможных мер для ограничения изменений ядерных характеристик активной зоны вследствие введения в нее смешанного оксидного топлива и возможного воздействия на системы и элементы является задание максимального числа сборок со смешанным оксидным топливом, загружаемых в активную зону. В качестве возможного варианта может рассматриваться загрузка активной зоны только смешанным оксидным топливом, но это потребовало бы дальнейшей адаптации реактора.

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- [1] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, "Безопасность атомных электростанций: проектирование, Серия норм безопасности", № NS-R-1, МАГАТЭ, Вена (2003).
- [2] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, "Безопасность атомных электростанций: эксплуатация", Серия норм безопасности, № NS-R-2, МАГАТЭ, Вена (2003).
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design of Fuel Handling and Storage Systems for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.4, IAEA, Vienna (2003).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.9, IAEA, Vienna (2004).
- [5] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, «Безопасность ядерных установок», Серия изданий по безопасности, № 110, МАГАТЭ, Вена (1994).
- [6] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, МЕЖДУНАРОДНОЕ БЮРО ТРУДА, «Радиационная защита при профессиональном облучении», Серия норм безопасности, № RS-G-1.1, Вена (1999).
- [7] АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА И РАЗВИТИЯ, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения, Серия изданий по безопасности, Серия изданий по безопасности № 115, МАГАТЭ, Вена (1997).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection Aspects of Design for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.13, IAEA, Vienna (2005).
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.3, IAEA, Vienna (2002).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Core Management and Fuel Handling for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.5, IAEA, Vienna (2002).

- [11] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Оценка и проверка безопасности атомных электростанций, Серия норм безопасности, №. NS-G-1.2, МАГАТЭ, Вена (2001).
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.10, IAEA, Vienna (2004).
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Maintenance, Surveillance and In-Service Inspection in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.6, IAEA, Vienna (2002).
- [14] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, «Обеспечение качества для безопасности атомных электростанций и других ядерных установок», Серия изданий МАГАТЭ по безопасности № 50-C/SG-Q, МАГАТЭ, Вена (1998).

ГЛОССАРИЙ

состояния станции (plant states).

эксплуатационные состояния

аварийные состояния

нормальная эксплуатация	Ожидаемые нарушения нормальной эксплуатации	(а)	проектные аварии	запроектные аварии	Тяжелые аварии
				(б)	
				управление авариями	

- а) Аварии, которые не квалифицируются определенно как проектные аварии, но охватываются последними.
- б) Запроектные аварии без значительного повреждения активной зоны.

аварийные условия (accident conditions).

Отклонения от нормальной эксплуатации, более серьезные, чем ожидаемые при эксплуатации события, включая проектные аварии и тяжелые аварии.

управление авариями (accident management).

Принятие комплекса мер во время развития последовательности событий запроектной аварии:

- с целью предотвращения эскалации данного события в тяжелую аварию;
- с целью смягчения последствий тяжелой аварии; и
- с целью достижения долгосрочного безопасного стабильного состояния.

ожидаемое при эксплуатации событие (anticipated operational occurrence).

Отклонение эксплуатационного процесса от нормальной эксплуатации, которое предположительно может произойти как минимум один раз в течение срока службы (жизненного цикла) установки, но которое благодаря соответствующим предусмотренным в проекте

мерам не нанесет значительного повреждения узлам, важным для безопасности, и не приведет к аварийным условиям.

проектная авария (design basis accident).

Аварийные условия, с учетом которых проектируется атомная электростанция в соответствии с установленными проектными критериями и при которых повреждение топлива и выбросы радиоактивного материала находятся в разрешенных пределах.

нормальная эксплуатация (normal operation).

Эксплуатация в рамках регламентированных эксплуатационных пределов и условий.

эксплуатационные состояния (operational states).

Состояния, оговариваемые определениями 'нормальная эксплуатация' и 'ожидаемые при эксплуатации события'.

тяжелая авария (severe accident).

Аварийные состояния, более тяжелые, чем проектная авария, которые вызывают значительные повреждения активной зоны.

система защиты (protection system).

Система, которая контролирует эксплуатацию реактора и которая при обнаружении ненормального условия (состояния) автоматически включает действия, направленные на предотвращение небезопасного или потенциально небезопасного режима.

функция безопасности (safety function).

Конкретная цель, которая должна быть достигнута для обеспечения безопасности.

система безопасности (safety system).

Система, важная для безопасности, обеспечивающая безопасный останов реактора или отвод остаточного тепла из активной зоны, либо ограничивающая последствия ожидаемых при эксплуатации событий и проектных аварий.

единичный отказ (single failure).

Отказ, который приводит к потере способности элемента выполнять предназначенные ему функции безопасности, а также любые последующие отказы, являющиеся результатом этого.

СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ

Anegawa, T.	Tokyo Electric Power Co., Япония
Brighton, P.	Her Majesty's Nuclear Installations Inspectorate, Соединенное Королевство
Langenbuch, S.	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Германия
Lauben, N.	Комиссия по ядерному регулированию, Соединенные Штаты Америки
Meneley, D	Atomic Energy of Canada Limited, Канада
Oliot, A.	Фрамагом, Франция
Saito, T.	Международное агентство по атомной энергии
Stelletta, S.	SEPTEN, Electricité de France, Франция
Tezuka, H.	Международное агентство по атомной энергии

ОРГАНЫ, УЧАСТВУЮЩИЕ В ОДОБРЕНИИ НОРМ БЕЗОПАСНОСТИ

Звездочкой () отмечены члены-корреспонденты. Членам-корреспондентам направляются проекты документов для замечаний, а также другая документация, но они, как правило, не принимают участия в работе совещаний.*

Комиссия по нормам безопасности

Аргентина: Oliveira, A.; Австралия: Loy, J.; Бразилия: Souza de Assis, A.; Канада: Pereira, J.K.; Китай: Li, G.; Чешская Республика: Drabova, D.; Дания: Ulbak, K.; Египет: Abdel-Namid, S.B.; Франция: Lacoste, A.-C.; Германия: Majer, D.; Индия: Sukhatme, S.P.; Япония: Abe, K.; Корея, Республика: Eun, Y.-S.; Пакистан: Hashimi, J.; Российская Федерация: Малышев, А.Б.; Испания: Azuaga, J.A.; Швеция: Holm, L.-E.; Швейцария: Schmocker, U.; Соединенное Королевство: Williams, L.G. (председатель); Соединенные Штаты Америки: Virgilio, M.; МАГАТЭ: Karbassioun, A.; Европейская комиссия: Waeterloos, C.; Международная комиссия по радиологической защите: Holm, L.-E.; Агентство по ядерной энергии ОЭСР: Shimomura, K.

Комитет по нормам ядерной безопасности

*Аргентина: Sajaroff, P.; Австралия: MacNab, D.; *Беларусь: Судаков, И.; Бельгия: Govaerts, P.; Бразилия: Salati de Almeida, I.P.; Болгария: Гантчев, Т.; Канада: Hawley, P.; Китай: Wang, J.; Чешская Республика: Вцћm, К.; *Египет: Hassib, G.; Финляндия: Reiman, L. (председатель); Франция: Saint Raymond, P.; Германия: Feige, G.; Венгрия: Vцruss, L.; Индия: Kushwaha, H.S.; Ирландия: Hone, C.; Израиль: Hirshfeld, H.; Япония: Yamamoto, T.; Корея, Республика: Lee, J.-I.; Литва: Демченко, М.; *Мексика: Delgado Guardado, J.L.; Нидерланды: de Munk, P.; *Пакистан: Hashimi, J.A.; *Перу: Ramnrez Quijada, R.; Российская Федерация: Баклушин, Р.П.; Южная Африка: Bester, P.J.; Испания: Mellado, I.; Швеция: Jende, E.; Швейцария: Aeberli, W.; *Таиланд: Tanipanichskul, P.; Турция: Alten, S.; Соединенное Королевство: Hall, A.; Соединенные Штаты Америки: Mayfield, M.E.; Европейская комиссия: Schwartz, J.-C.; МАГАТЭ: Bevington, L. (координатор); Международная организация по стандартизации: Nigon, J.L.; Агентство по ядерной энергии ОЭСР: Hrehor, M.*

Комитет по нормам радиационной безопасности

*Аргентина: Rojkind, R.H.A.; Австралия: Melbourne, A.; *Беларусь: Рыдлевский, Л.; Бельгия: Smeesters, P.; Бразилия: Amaral, E.; Канада: Bundy, K.; Куба: Betancourt Hernandez, A.; Чешская Республика: Drabova, D.; Дания: Ulbak, K.; *Египет: Hanna, M.; Финляндия: Markkanen, M.; Франция: Piechowski, J.; Германия: Landfermann, H.; Венгрия: Koblinger, L.; Индия: Sharma, D.N.; Ирландия: Colgan, T.; Израиль: Laichter, Y.; Италия: Sgrilli, E.; Япония: Yamaguchi, J.; Корея, Республика: Kim, C.; *Мадагаскар: Andriambololona, R.; *Мексика: Delgado Guardado, J.; *Нидерланды: Zuur, C.; Норвегия:*

Saxeбол, G.; *Перу: Medina Gironzini, E.; Польша: Merta, A.; Российская Федерация: Кутков, В.; Словакия: Jurina, V.; Южная Африка: Olivier, J.H.L.; Испания: Amor, I.; Швеция: Hofvander, P.; Moberg, L.; Швейцария: Pfeiffer, H.J.; *Таиланд: Pongpat, P.; Турция: Uslu, I.; Украина: Лихтарев, И.А.; Соединенное Королевство: Robinson, I. (председатель); Соединенные Штаты Америки: Paperiello, C.; Европейская комиссия: Janssens, A.; МАГАТЭ: Boal, T. (координатор); Международная комиссия по радиологической защите: Valentin, J.; Международное бюро труда: Niu, S.; Международная ассоциация радиационной защиты: Webb, G.; Международная организация по стандартизации: Perrin, M.; Международная ассоциация радиационной защиты: Webb, G.; Агентство по ядерной энергии ОЭСР: Lazo, T.; Панамериканская организация здравоохранения: Jimenez, P.; Научный комитет ООН по действию атомной радиации: Gentner, N.; Всемирная организация здравоохранения: Сагг, Z.

Комитет по нормам безопасности перевозки

Аргентина: Lyppez Vietri, J.; Австралия: Colgan, P.; *Беларусь: Зайцев, С.; Бельгия: Cottens, E.; Бразилия: Mezrahi, A.; Болгария: Бакалова, А.; Канада: Viglasky, T.; Китай: Pu, Y.; *Дания: Hannibal, L.; Египет: El-Shinawy, R.M.K.; Франция: Aguilar, J.; Германия: Rein, H.; Венгрия: Söföг, J.; Индия: Nandakumar, A.N.; Ирландия: Duffy, J.; Израиль: Koch, J.; Италия: Trivelloni, S.; Япония: Saito, T.; Корея, Республика: Kwon, S.-G.; Нидерланды: Van Halem, H.; Норвегия: Hornkjshl, S.; *Перу: Regalado Camraca, S.; Румыния: Vieru, G.; Российская Федерация: Ершов, В.Н.; Южная Африка: Jutle, K.; Испания: Zamora Martin, F.; Швеция: Pettersson, B.G.; Швейцария: Knecht, B.; *Таиланд: Jerachanchai, S.; Турция: Кцксал, М.Е.; Соединенное Королевство: Young, C.N. (председатель); Соединенные Штаты Америки: Brach, W.E.; McGuire, R.; Европейская комиссия: Rossi, L.; Международная ассоциация воздушного транспорта: Abouchaar, J.; МАГАТЭ: Wangler, M.E. (координатор); Международная организация гражданской авиации: Rooney, K.; Международная федерация ассоциаций линейных пилотов: Tisdall, A.; Международная морская организация: Rahim, I.; Международная организация по стандартизации: Malesys, P.; Экономическая комиссия Организации Объединенных Наций для Европы: Kervella, O.; Всемирный институт по ядерным перевозкам: Lesage, M.

Комитет по нормам безопасности отходов

Аргентина: Siraky, G.; Австралия: Williams, G.; *Беларусь: Роздяловская, Л.; Бельгия: Baekelandt, L. (председатель); Бразилия: Xavier, A.; *Болгария: Симеонов, Г.; Канада: Ferch, R.; Китай: Fan, Z.; Куба: Benitez, J.; *Дания: Шхлenschlaeger, M.; *Египет: Al Adham, K.; Al Sorogi, M.; Финляндия: Rukola, E.; Франция: Averous, J.; Германия: von Dobschütz, P.; Венгрия: Czoch, I.; Индия: Raj, K.; Ирландия: Pollard, D.; Израиль: Avraham, D.; Италия: Dionisi, M.; Япония: Irie, K.; Корея, Республика: Song, W.; *Мадагаскар: Andriambolona, R.; Мексика: Aguirre Gymez, J.; Нидерланды: Selling, H.; *Норвегия: Sorlie, A.; Пакистан: Hussain, M.; *Перу: Gutierrez, M.; Российская Федерация: Полуэктов, П.П.; Словацкая Республика: Конесну, Л.; Южная Африка: Pather, T.; Испания: Lyppez de la Higuera, Ruiz Lyppez, C.; Швеция: Wingefors, S.; Швейцария: Zurkinden, A.; *Таиланд: Wangcharoenroong, B.; Турция: Osmanlioglu, A.;

Соединенное Королевство: Wilson, С.; Соединенные Штаты Америки: Greeves, J.; Wallo, А.; Европейская комиссия: Taylor, D.; МАГАТЭ: Hioki, К. (координатор); Международная комиссия по радиологической защите: Valentin, J.; Международная организация по стандартизации: Hutson, G.; Агентство по ядерной энергии ОЭСР: Riotte, Н.

Обеспечение безопасности посредством международных норм

“Нормы МАГАТЭ стали ключевым элементом глобального режима обеспечения безопасности полезного применения ядерных и радиационных технологий.

Нормы безопасности МАГАТЭ применяются при производстве ядерной энергии, а также в медицине, промышленности, сельском хозяйстве, исследованиях и образовании с целью обеспечения надлежащей защиты людей и охраны окружающей среды.”

Мохамед ЭльБарадей
Генеральный директор МАГАТЭ