

# Нормы безопасности МАГАТЭ

для защиты людей и охраны окружающей среды

## Проектирование активных зон реакторов атомных электростанций

Специальное руководство по безопасности  
№ SSG-52



**IAEA**

Международное агентство по атомной энергии

# НОРМЫ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ И ДРУГИЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДАННОЙ ТЕМЕ

## НОРМЫ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ

В соответствии со статьей III своего Устава МАГАТЭ уполномочено устанавливать или принимать нормы безопасности для защиты здоровья и сведения к минимуму опасностей для жизни и имущества и обеспечивать применение этих норм.

**Публикации, посредством которых МАГАТЭ устанавливает нормы, выпускаются в Серии норм безопасности МАГАТЭ.** В этой серии охватываются вопросы ядерной безопасности, радиационной безопасности, безопасности перевозки и безопасности отходов. **Категории публикаций в этой серии — это Основы безопасности, Требования безопасности и Руководства по безопасности.**

Информацию о программе по нормам безопасности МАГАТЭ можно получить на сайте МАГАТЭ в Интернете

[www.iaea.org/ru/resursy/normy-bezopasnosti](http://www.iaea.org/ru/resursy/normy-bezopasnosti)

На этом сайте содержатся тексты опубликованных норм безопасности и проектов норм безопасности на английском языке. Тексты норм безопасности выпускаются на арабском, испанском, китайском, русском и французском языках, там также можно найти глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности и доклад о ходе работы над еще не выпущенными нормами безопасности. Для получения дополнительной информации просьба обращаться в МАГАТЭ по адресу: Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria.

Всем пользователям норм безопасности МАГАТЭ предлагается сообщать МАГАТЭ об опыте их использования (например, в качестве основы для национальных регулирующих положений, для составления обзоров безопасности и учебных курсов) в целях обеспечения того, чтобы они по-прежнему отвечали потребностям пользователей. Эта информация может быть направлена через сайт МАГАТЭ в Интернете или по почте (см. адрес выше), или по электронной почте по адресу [Official.Mail@iaea.org](mailto:Official.Mail@iaea.org).

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ДАННОЙ ТЕМЕ

МАГАТЭ обеспечивает применение норм и в соответствии со статьями III и VIII.C своего Устава предоставляет сведения и способствует обмену информацией, касающейся мирной деятельности в ядерной области, и служит в этом посредником между своими государствами-членами.

Доклады по вопросам безопасности в ядерной деятельности выпускаются в качестве **докладов по безопасности**, в которых приводятся практические примеры и подробные описания методов, которые могут использоваться в поддержку норм безопасности.

Другие публикации МАГАТЭ по вопросам безопасности выпускаются в качестве публикаций по **аварийной готовности и реагированию, докладов по радиологическим оценкам, докладов ИНСАГ** — Международной группы по ядерной безопасности, **технических докладов** и документов серии **ТЕСДОС**. МАГАТЭ выпускает также доклады по радиологическим авариям, учебные пособия и практические руководства, а также другие специальные публикации по вопросам безопасности.

Публикации по вопросам физической безопасности выпускаются в **Серии изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности**.

**Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии** состоит из информационных публикаций, предназначенных способствовать и содействовать научно-исследовательской работе в области ядерной энергии, а также развитию ядерной энергии и ее практическому применению в мирных целях. В ней публикуются доклады и руководства о состоянии технологий и успехах в их совершенствовании, об опыте, образцовой практике и практических примерах в области ядерной энергетики, ядерного топливного цикла, обращения с радиоактивными отходами и снятия с эксплуатации.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЗОН  
РЕАКТОРОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

АВСТРАЛИЯ	КАЗАХСТАН	РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
АВСТРИЯ	КАМБОДЖА	РУАНДА
АЗЕРБАЙДЖАН	КАМЕРУН	РУМЫНИЯ
АЛБАНИЯ	КАНАДА	САЛЬВАДОР
АЛЖИР	КАТАР	САМОА
АНГОЛА	КЕНИЯ	САН-МАРИНО
АНТИГУА И БАРБУДА	КИПР	САУДОВСКАЯ АРАВИЯ
АРГЕНТИНА	КИТАЙ	СВЯТОЙ ПРЕСТОЛ
АРМЕНИЯ	КОЛУМБИЯ	СЕВЕРНАЯ МАКЕДОНИЯ
АФГАНИСТАН	КОМОРСКИЕ ОСТРОВА	СЕЙШЕЛЬСКИЕ ОСТРОВА
БАГАМСКИЕ ОСТРОВА	КОНГО	СЕНЕГАЛ
БАНГЛАДЕШ	КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	СЕНТ-ВИНСЕНТ И ГРЕНАДИНЫ
БАРБАДОС	КОСТА-РИКА	СЕНТ-КИТС И НЕВИС
БАХРЕЙН	КОТ-Д'ИВУАР	СЕНТ-ЛЮСИЯ
БЕЛАРУСЬ	КУБА	СЕРБИЯ
БЕЛИЗ	КУВЕЙТ	СИНГАПУР
БЕЛЬГИЯ	КЫРГЫЗСТАН	СИРИЙСКАЯ АРАБСКАЯ РЕСПУБЛИКА
БЕНИН	ЛАОССКАЯ НАРОДНО- ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА	СЛОВАКИЯ
БОЛГАРИЯ	ЛАТВИЯ	СЛОВЕНИЯ
БОЛИВИЯ, МНОГОНАЦИОНАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВО	ЛЕСОТО	СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО ВЕЛИКОБРИТАНИИ И СЕВЕРНОЙ ИРЛАНДИИ
БОСНИЯ И ГЕРЦЕГОВИНА	ЛИБЕРИЯ	СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ
БОТСВАНА	ЛИВАН	СОМАЛИ
БРАЗИЛИЯ	ЛИВИЯ	СУДАН
БРУНЕЙ-ДАРУССАЛАМ	ЛИТВА	СЬЕРРА-ЛЕОНЕ
БУРКИНА-ФАСО	ЛИХТЕНШТЕЙН	ТАДЖИКИСТАН
БУРУНДИ	ЛЮКСЕМБУРГ	ТАИЛАНД
ВАНУАТУ	МАВРИКИЙ	ТОГО
ВЕНГРИЯ	МАВРИТАНИЯ	ТОНГА
ВЕНЕСУЭЛА, БОЛИВАРИАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	МАДАГАСКАР	ТРИНИДАД И ТОБАГО
ВЬЕТНАМ	МАЛАВИ	ТУНИС
ГАБОН	МАЛАЙЗИЯ	ТУРКМЕНИСТАН
ГАИТИ	МАЛИ	ТУРЦИЯ
ГАЙАНА	МАЛЬТА	УГАНДА
ГАМБИЯ	МАРОККО	УЗБЕКИСТАН
ГАНА	МАРШАЛЛОВЫ ОСТРОВА	УКРАИНА
ГАТЕМАЛА	МЕКСИКА	УРУГВАЙ
ГВИНЕЯ	МОЗАМБИК	ФИДЖИ
ГЕРМАНИЯ	МОНАКО	ФИЛИППИНЫ
ГОНДУРАС	МОНГОЛИЯ	ФИНЛЯНДИЯ
ГРЕНАДА	МЬЯНМА	ФРАНЦИЯ
ГРЕЦИЯ	НАМИБИЯ	ХОРВАТИЯ
ГРУЗИЯ	НЕПАЛ	ЦЕНТРАЛЬНОАФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ДАНИЯ	НИГЕР	ЧАД
ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА КОНГО	НИГЕРИЯ	ЧЕРНОГОРИЯ
ДЖИБУТИ	НИДЕРЛАНДОВ, КОРОЛЕВСТВО	ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ДОМИНИКА	НИКАРАГУА	ЧИЛИ
ДОМИНИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	НОВАЯ ЗЕЛАНДИЯ	ШВЕЙЦАРИЯ
ЕГИПЕТ	НОРВЕГИЯ	ШВЕЦИЯ
ЗАМБИЯ	ОБЪЕДИНЕННАЯ РЕСПУБЛИКА ТАНЗАНИЯ	ШРИ-ЛАНКА
ЗИМБАБВЕ	ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ	ЭКВАДОР
ИЗРАИЛЬ	ОМАН	ЭРИТРЕЯ
ИНДИЯ	ОСТРОВА КУКА	ЭСВАТИНИ
ИНДОНЕЗИЯ	ПАКИСТАН	ЭСТОНИЯ
ИОРДАНИЯ	ПАЛАУ	ЭФИОПИЯ
ИРАК	ПАНАМА	ЮЖНАЯ АФРИКА
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСПУБЛИКА	ПАПУА — НОВАЯ ГВИНЕЯ	ЯМАЙКА
ИРЛАНДИЯ	ПАРАГВАЙ	ЯПОНИЯ
ИСЛАНДИЯ	ПЕРУ	
ИСПАНИЯ	ПОЛЬША	
ИТАЛИЯ	ПОРТУГАЛИЯ	
ЙЕМЕН	РЕСПУБЛИКА МОЛДОВА	
КАБО-ВЕРДЕ		

Устав Агентства был утвержден 23 октября 1956 года на Конференции по выработке Устава МАГАТЭ, которая состоялась в Центральном учреждении 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 БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ, № SSG-52

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ  
ЗОН РЕАКТОРОВ АТОМНЫХ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

СПЕЦИАЛЬНОЕ РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ  
ВЕНА, 2025

## УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

Все научные и технические публикации МАГАТЭ защищены положениями Всемирной конвенции об авторском праве, принятой в 1952 году (Женева) и пересмотренной в 1971 году (Париж). Впоследствии авторские права были распространены Всемирной организацией интеллектуальной собственности (Женева) также на интеллектуальную собственность в электронной и виртуальной форме. Для полного или частичного использования текстов, содержащихся в печатных или электронных публикациях МАГАТЭ, может потребоваться разрешение. Более подробная информация приводится на странице <https://www.iaea.org/ru/publikacii/prava-i-razresheniya>. Вопросы следует направлять по адресу:

Издательская секция (Publishing Section)  
Международное агентство по атомной  
энергии  
Венский международный центр,  
а/я 100,  
A1400 Вена, Австрия  
тел.: +43 1 2600 22529 или 22530  
эл. почта: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)  
<https://www.iaea.org/ru/publikacii>

© МАГАТЭ, 2025

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии

Март, 2025

STI/PUB/1859

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ АТОМНЫХ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ  
МАГАТЭ, ВЕНА, 2025 ГОД  
STI/PUB/1859  
ISBN 978-92-0-453023-0 (ISBN печатный формат) 978-92-0-452823-7  
(ISBN формат pdf) 978-92-0-452923-4 (формат epub)  
ISSN 1020-5845

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Устав МАГАТЭ уполномочивает Агентство «устанавливать или применять ... 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. МАГАТЭ осуществляет это в консультации с компетентными органами Организации Объединенных Наций и с заинтересованными специализированными учреждениями. Всеобъемлющий свод высококачественных и регулярно пересматриваемых норм безопасности наряду с помощью МАГАТЭ в их применении является ключевым элементом стабильного и устойчивого глобального режима безопасности.

МАГАТЭ начало осуществлять свою программу по нормам безопасности в 1958 году. Значение, уделяемое качеству, соответствию поставленной цели и постоянному совершенствованию, лежит в основе широкого применения норм МАГАТЭ во всем мире. Серия норм безопасности теперь включает единообразные основополагающие принципы безопасности, которые выработаны на основе международного консенсуса в отношении того, что должно пониматься под высоким уровнем защиты и безопасности. При твердой поддержке со стороны Комиссии по нормам безопасности МАГАТЭ проводит работу с целью содействия глобальному признанию и использованию своих норм.

Однако нормы эффективны лишь тогда, когда они надлежащим образом применяются на практике. Услуги МАГАТЭ в области безопасности охватывают вопросы проектирования, выбора площадки и инженерно-технической безопасности, эксплуатационной безопасности, радиационной безопасности, безопасной перевозки радиоактивных материалов и безопасного обращения с радиоактивными отходами, а также вопросы государственной основы, регулирования и культуры безопасности в организациях. Эти услуги в области безопасности содействуют государствам-членам в применении норм и позволяют обмениваться ценным опытом и данными.

Ответственность за деятельность по регулированию безопасности возлагается на страны, и многие государства принимают решения применять нормы МАГАТЭ по безопасности в своих национальных регулирующих положениях. Для сторон различных международных конвенций по безопасности нормы МАГАТЭ являются согласованным и надежным средством обеспечения эффективного выполнения обязательств, вытекающих из этих конвенций. Эти нормы применяются

также регулируемыми органами и операторами во всем мире в целях повышения безопасности при производстве ядерной энергии и применении ядерных методов в медицине, промышленности, сельском хозяйстве и научных исследованиях.

Безопасность — это не самоцель, а необходимое условие защиты людей во всех государствах и охраны окружающей среды в настоящее время и в будущем. Риски, связанные с ионизирующими излучениями, должны оцениваться и контролироваться без неоправданного ограничения вклада ядерной энергии в справедливое и устойчивое развитие. Правительства, регулирующие органы и операторы во всем мире должны обеспечивать, чтобы ядерный материал и источники излучения использовались для всеобщего блага, в условиях безопасности и с учетом мнения общественности. Для содействия этому предназначены нормы МАГАТЭ по безопасности, которые я призываю применять все государства-члены.

# НОРМЫ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Радиоактивность — это естественное явление, и в окружающей среде присутствуют природные (естественные) источники излучения. Ионизирующие излучения и радиоактивные вещества с пользой применяются во многих сферах — от производства энергии до использования в медицине, промышленности и сельском хозяйстве. Радиационные риски, которым в результате этих применений могут подвергаться работники, население и окружающая среда, подлежат оценке и должны в случае необходимости контролироваться.

Поэтому такая деятельность, как медицинское использование излучения, эксплуатация ядерных установок, производство, перевозка и использование радиоактивных материалов и обращение с радиоактивными отходами, должна осуществляться в соответствии с нормами безопасности.

Ответственность за регулирование в области безопасности возлагается на государства. Однако радиационные риски могут выходить за пределы национальных границ, и в рамках международного сотрудничества принимаются меры по обеспечению и укреплению безопасности в глобальном масштабе посредством обмена опытом и расширения возможностей для контроля опасностей, предотвращения аварий, реагирования в случае аварийных ситуаций и смягчения любых вредных последствий.

Государства обязаны проявлять должную осмотрительность и соответствующую осторожность, и предполагается, что они будут выполнять свои национальные и международные обязательства.

Международные нормы безопасности содействуют выполнению государствами своих обязательств согласно общим принципам международного права, например, касающимся охраны окружающей среды. Кроме того, международные нормы безопасности укрепляют и обеспечивают уверенность в безопасности и способствуют международной торговле.

Глобальный режим ядерной безопасности постоянно совершенствуется. Нормы безопасности МАГАТЭ, которые поддерживают осуществление имеющих обязательную силу международных договорно-правовых документов и функционирование национальных инфраструктур безопасности, являются краеугольным камнем этого глобального режима. Нормы безопасности МАГАТЭ представляют собой полезный инструмент, с помощью которого договаривающиеся стороны оценивают свою деятельность по выполнению этих конвенций.

## НОРМЫ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ

Статус норм безопасности МАГАТЭ вытекает из Устава МАГАТЭ, которым МАГАТЭ уполномочивается устанавливать и применять, в консультации и в надлежащих случаях в сотрудничестве с компетентными органами Организации Объединенных Наций и с заинтересованными специализированными учреждениями, нормы безопасности для охраны здоровья и сведения к минимуму опасности для жизни и имущества и обеспечивать применение этих норм.

В целях обеспечения защиты людей и охраны окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения нормы безопасности МАГАТЭ устанавливают основополагающие принципы безопасности, требования и меры для обеспечения контроля за радиационным облучением людей и выбросом радиоактивного материала в окружающую среду, ограничения вероятности событий, которые могут привести к утрате контроля за активной зоной ядерного реактора, ядерной цепной реакцией, радиоактивным источником или любым другим источником излучения, и смягчения последствий таких событий в случае, если они будут иметь место. Нормы касаются установок и деятельности, связанных с радиационными рисками, включая ядерные установки, использование радиационных и радиоактивных источников, перевозку радиоактивных материалов и обращение с радиоактивными отходами.

Меры по обеспечению безопасности и физической безопасности<sup>1</sup> преследуют общую цель защиты жизни и здоровья людей и охраны окружающей среды. Меры по обеспечению безопасности и физической безопасности должны разрабатываться и осуществляться комплексно таким образом, чтобы меры по обеспечению физической безопасности не осуществлялись в ущерб безопасности, и наоборот, чтобы меры по обеспечению безопасности не осуществлялись в ущерб физической безопасности.

Нормы безопасности МАГАТЭ отражают международный консенсус в отношении того, что является основой высокого уровня безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения. Они выпускаются в Серии норм безопасности МАГАТЭ, которая состоит из документов трех категорий (см. рис. 1).

---

<sup>1</sup> См. также публикации в серии изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности.



РИС. 1. Долгосрочная структура Серии норм безопасности МАГАТЭ.

## Основы безопасности

Основы безопасности содержат основополагающие цели и принципы защиты и безопасности и служат основой для требований безопасности.

## Требования безопасности

Комплексный и согласованный свод требований безопасности устанавливает требования, которые должны выполняться с целью обеспечения защиты людей и охраны окружающей среды в настоящее время и в будущем. Эти требования устанавливаются в соответствии с целями и принципами, изложенными в Основах безопасности. Если требования не выполняются, то должны приниматься меры для достижения или восстановления требуемого уровня безопасности. Формат и стиль требований облегчают их гармоничное использование для создания национальной основы регулирования. Требования, включая пронумерованные всеобъемлющие требования, выражаются формулировками «должен, должна, должно, должны». Многие требования конкретно не адресуются, а это означает, что за их выполнение отвечают соответствующие стороны.

## **Руководства по безопасности**

В руководствах по безопасности содержатся рекомендации и руководящие материалы, касающиеся выполнения требований безопасности, и в них выражается международный консенсус в отношении необходимости принятия рекомендуемых мер (или эквивалентных альтернативных мер). В руководствах по безопасности представлена международная надлежащая практика, и они во все большей степени отражают наилучшую практику, помогающую пользователям достичь высокого уровня безопасности. Рекомендации, содержащиеся в руководствах по безопасности, формулируются с применением глагола «следует».

## **ПРИМЕНЕНИЕ НОРМ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ**

Основными пользователями норм безопасности в государствах — членах МАГАТЭ являются регулирующие и другие соответствующие государственные органы. Кроме того, нормы безопасности МАГАТЭ используются другими организациями-спонсорами и многочисленными организациями, которые занимаются проектированием, сооружением и эксплуатацией ядерных установок, а также организациями, участвующими в использовании радиационных и радиоактивных источников.

Нормы безопасности МАГАТЭ применяются в соответствующих случаях на протяжении всего жизненного цикла всех имеющихся и новых установок, используемых в мирных целях, и на протяжении всей нынешней и новой деятельности в мирных целях, а также в отношении защитных мер, применяемых с целью уменьшения существующих радиационных рисков. Они могут использоваться государствами в качестве основы для национальных регулирующих положений в отношении установок и деятельности.

Согласно Уставу МАГАТЭ нормы безопасности являются обязательными для МАГАТЭ применительно к его собственной деятельности, а также для государств применительно к работе, выполняемой с помощью МАГАТЭ.

Кроме того, нормы безопасности МАГАТЭ формируют основу для услуг МАГАТЭ по рассмотрению безопасности, и они используются МАГАТЭ для повышения компетентности, включая разработку учебных планов и проведение учебных курсов.

Международные конвенции содержат требования, которые аналогичны требованиям, изложенным в нормах безопасности МАГАТЭ, и являются обязательными для договаривающихся сторон. Нормы безопасности МАГАТЭ, подкрепляемые международными конвенциями,

отраслевыми стандартами и подробными национальными требованиями, создают прочную основу для защиты людей и охраны окружающей среды. Существуют также некоторые особые вопросы безопасности, требующие оценки на национальном уровне. Например, многие нормы безопасности МАГАТЭ, особенно нормы, посвященные вопросам планирования или разработки мер по обеспечению безопасности, предназначаются, прежде всего, для применения к новым установкам и видам деятельности. На некоторых существующих установках, сооруженных в соответствии с нормами, принятыми ранее, не возможно выполнять в полном объеме требования, установленные в нормах безопасности МАГАТЭ. Вопрос о том, как нормы безопасности МАГАТЭ должны применяться на таких установках, решают сами государства.

Научные соображения, лежащие в основе норм безопасности МАГАТЭ, обеспечивают объективную основу для принятия решений по вопросам безопасности; однако органы, отвечающие за принятие решений, должны также выносить обоснованные суждения, а также должны определять, как обеспечить оптимальный баланс между пользой от принимаемых мер или осуществляемых мероприятий и связанными с ними радиационными рисками и любыми иными негативными последствиями применения этих мер или мероприятий.

## ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ НОРМ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ

Подготовкой и рассмотрением норм безопасности занимаются Секретариат МАГАТЭ и пять комитетов по нормам безопасности, охватывающих аварийную готовность и реагирование (ЭПРеСК), ядерную безопасность (НУССК), радиационную безопасность (РАССК), безопасность радиоактивных отходов (ВАССК) и безопасную перевозку радиоактивных материалов (ТРАНССК), а также Комиссия по нормам безопасности (КНБ), которая осуществляет надзор за программой по нормам безопасности МАГАТЭ (см. рис. 2).

Все государства — члены МАГАТЭ могут назначать экспертов в комитеты по нормам безопасности и представлять замечания по проектам норм. Члены Комиссии по нормам безопасности назначаются Генеральным директором, и в ее состав входят старшие правительственные должностные лица, несущие ответственность за установление национальных норм.

Для осуществления процессов планирования, разработки, рассмотрения, пересмотра и установления норм безопасности МАГАТЭ создана система управления. Особое место в ней занимают мандат МАГАТЭ,



*Рис. 2. Процесс разработки новых норм безопасности или пересмотр существующих норм.*

видение будущего применения норм, политики и стратегий безопасности и соответствующие функции и обязанности.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ДРУГИМИ МЕЖДУНАРОДНЫМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ

При разработке норм безопасности МАГАТЭ учитываются 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 безопасности разрабатываются в сотрудничестве с другими органами системы Организации Объединенных Наций или другими специализированными учреждениями, включая Продовольственную и сельскохозяйственную организацию Объединенных Наций, Программу

Организации Объединенных Наций по окружающей среде, Международную организацию труда, Агентство по ядерной энергии ОЭСР, Панамериканскую организацию здравоохранения и Всемирную организацию здравоохранения.

## ТОЛКОВАНИЕ ТЕКСТА

Относящиеся к ядерной и физической безопасности термины следует понимать так, как они представлены в Глоссарии МАГАТЭ по ядерной и физической безопасности (см. <https://www.iaea.org/resources/publications/iaea-nuclear-safety-and-security-glossary>). Во всех остальных случаях в издании на английском языке слова используются с написанием и значением, приведенными в последнем издании Краткого оксфордского словаря английского языка. Для руководств по безопасности аутентичным текстом является английский вариант.

Общие сведения и соответствующий контекст норм в Серии норм безопасности МАГАТЭ, а также их цель, сфера применения и структура приводятся в разделе 1 «Введение» каждой публикации.

Материал, который нецелесообразно включать в основной текст (например, материал, являющийся вспомогательным или отдельным от основного текста, дополняет формулировки основного текста или описывает методы расчетов, процедуры или пределы и условия), может быть представлен в дополнениях или приложениях.

Дополнение, если оно включено, рассматривается в качестве неотъемлемой части норм безопасности. Материал в дополнении имеет тот же статус, что 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. Приложения и сноски не являются неотъемлемой частью основного текста. Материал в приложениях, опубликованный МАГАТЭ, не обязательно выпускается в качестве его авторского материала; в приложениях к нормам безопасности может быть представлен материал, имеющий другое авторство. Посторонний материал, публикуемый в приложениях, приводится в виде выдержек и адаптируется по мере необходимости, с тем чтобы быть в целом полезным.



## СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ .....	1
	Общие сведения (1.1) .....	1
	Цель (1.2) .....	1
	Область применения (1.3–1.8) .....	1
	Структура (1.9, 1.10) .....	3
2.	ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА .	4
	Система управления (2.1) .....	4
	Цели проектирования (2.2–2.8) .....	4
	Проектные основы конструкций, систем и элементов активной зоны реактора (2.9–2.20) .....	6
	Проектирование в целях безопасной эксплуатации (2.21–2.23) ..	9
	Анализ безопасности активной зоны реактора (2.24–2.27) .....	10
3.	КОНКРЕТНЫЕ СВЯЗАННЫЕ С БЕЗОПАСНОСТЬЮ СООБРАЖЕНИЯ, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА .	12
	Общие положения (3.1–3.15) .....	12
	Нейтронно-физическое проектирование (3.16–3.25) .....	15
	Теплогидравлическое проектирование (3.26–3.33) .....	19
	Термомеханическое проектирование твэлов и тепловыделяющих сборок (3.34–3.76) .....	22
	Механическое проектирование конструкций и компонентов активной зоны (3.77–3.88) .....	36
	Системы управления, останова и мониторинга активной зоны реактора (3.89–3.138) .....	38
	Управление активной зоной (3.139–3.166) .....	52
4.	КВАЛИФИКАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ .....	62
	Общие положения (4.1) .....	62
	Квалификация проекта (4.2–4.5) .....	62
	Инспекции (4.6) .....	63

Испытания с использованием прототипных и головных сборок (4.7–4.10) . . . . .	63
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ . . . . .	67
Приложение I: ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ. . . . .	69
Приложение II: АСПЕКТЫ, КОТОРЫЕ НЕОБХОДИМО УЧИТЫВАТЬ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТВЭЛОВ, ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК, СБОРОК УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОСТЬЮ, СБОРОК НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ И СБОРОК ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЗАГЛУШЕК. . . . .	89
СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ . . . . .	93

# 1. ВВЕДЕНИЕ

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации по проектированию активной зоны реактора в соответствии с требованиями, установленными в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-2/1 (Rev. 1), «Безопасность атомных электростанций: проектирование» [1]. Настоящая публикация представляет собой пересмотренный вариант публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № NS-G-1.12<sup>1</sup>, которую она заменяет.

## ЦЕЛЬ

1.2. Целью настоящего Руководства по безопасности является предоставление рекомендаций по соблюдению требований безопасности, установленных в публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] в отношении проектирования активных зон реакторов атомных электростанций.

## ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.3. Настоящее Руководство по безопасности адресовано в первую очередь наземным стационарным атомным электростанциям с водоохлаждаемыми реакторами, используемым для производства электроэнергии или производства тепловой энергии в других целях (например, для централизованного теплоснабжения или опреснения воды). Все содержащиеся в нем рекомендации применимы к легководным реакторам (то есть, реакторам с водой под давлением и кипящим реакторам) и в целом применимы к тяжеловодным реакторам с водой под давлением, за исключением особо оговоренных случаев. Настоящее Руководство по безопасности может также применяться, с оговорками, в отношении реакторов других типов (например, газоохлаждаемых реакторов, реакторов плавучих АЭС, реакторов малой мощности и модульных реакторов, инновационных реакторов), с тем чтобы способствовать интерпретации

---

<sup>1</sup> МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Проектирование активных зон реакторов атомных электростанций, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № NS-G-1.12, МАГАТЭ, Вена (2006).

требований, которые необходимо учитывать при разработке проекта активной зоны реактора.

1.4. Активная зона — это центральная часть ядерного реактора, в которой происходит деление ядер. Активная зона реактора состоит из четырех основных систем и компонентов (т.е. топлива (включая твэлы и конструкцию тепловыделяющих сборок), теплоносителя, замедлителя и регулирующих стержней), а также дополнительных конструкций (т.е. внутрикорпусных устройств корпуса реактора, опорных плит активной зоны и нижних и верхних внутренних конструкций в легководных реакторах). В настоящем Руководстве по безопасности рассмотрены аспекты безопасности при проектировании активной зоны, в том числе нейтронно-физические аспекты, теплогидравлические аспекты, термомеханические аспекты, структурно-механические аспекты, аспекты, связанные с управлением активной зоной реактора, ее останом и мониторингом, а также аспекты управления активной зоной при проектировании активных зон реакторов атомных электростанций с учетом требований безопасности. Конкретно рассмотрены следующие конструкции, системы и элементы (КСЭ):

- a) твэлы, содержащие топливные таблетки с выгорающим поглотителем или без него в трубках оболочки твэла, которые выделяют тепло и передают его теплоносителю;
- b) тепловыделяющие сборки, включающие пучки твэлов с конструкциями и компонентами (например, направляющими каналами, дистанционирующими решетками, головками и хвостовиками, топливными каналами), которые обеспечивают заданную геометрическую конфигурацию твэлов и тепловыделяющихборок;
- c) система управления, система останова и система мониторинга активной зоны, включая компоненты и оборудование, используемые для управления реактивностью и останова, состоящие из поглотителей нейтронов (твердых или жидких), вспомогательных конструкций и приводных механизмов;
- d) опорные конструкции, составляющие основание активной зоны внутри корпуса реактора (внутри каландра тяжеловодных реакторов с водой под давлением), конструкция для направления потока теплоносителя (в реакторах с водой под давлением) и направляющие трубы для устройств управления реактивностью (в тяжеловодных реакторах с водой под давлением);
- e) теплоноситель;
- f) замедлитель;

г) другие компоненты активной зоны, такие как сепараторы пара (в кипящих реакторах) и нейтронные источники. В настоящем Руководстве по безопасности эти компоненты рассматриваются лишь в ограниченной степени.

1.5. Настоящее Руководство по безопасности предназначено в основном для АЭС, использующих в качестве топлива природный и обогащенный  $UO_2$ , а также топливо, содержащее смесь  $UO_2$  с плутонием (смешанное оксидное топливо), с оболочкой твэла из сплава на основе циркония. Если особо не оговорено иное, все рекомендации применимы к этим видам топлива.

1.6. К инновационным материалам ядерного топлива, таким как топливо на основе нитрида урана или топливо с матрицей из инертных материалов, а также к материалам оболочки твэла из сплавов не на основе циркония положения настоящего Руководства по безопасности могут применяться с использованием экспертных оценок.

1.7. Проектирование активной зоны может быть взаимосвязано с проектированием других систем реактора и другими соответствующими аспектами. Рекомендации, содержащиеся в настоящем Руководстве по безопасности в части таких взаимосвязанных систем и аспектов, приведены главным образом с целью определения их функционального взаимодействия. При необходимости для пояснения таких взаимодействий приводятся ссылки на соответствующие руководства по безопасности.

1.8. Используемые в настоящем Руководстве по безопасности термины следует понимать в соответствии с определениями, содержащимися в Глоссарии МАГАТЭ по вопросам безопасности [2]. Пояснения других технических терминов приведены в приложении I.

## СТРУКТУРА

1.9. В разделе 2 приведено описание общих соображений, связанных с проектированием активной зоны с учетом требований безопасности на основе требований по управлению безопасностью, основных технических требований и общих требований к проектированию, содержащихся соответственно в разделах 3, 4 и 5 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1]. В разделе 3 изложены конкретные вопросы проектирования с учетом требований безопасности твэлов и тепловыделяющих сборок, конструкций активной зоны и компонентов активной зоны, а также системы управления

активной зоной и системы останова реактора на основе конкретных проектных требований (например, требований 43–46) публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1]. Раздел 4 содержит рекомендации по квалификации и испытаниям КСЭ активной зоны реактора.

1.10. В приложении I приведены дополнительная техническая информация для пояснения терминологии, использованной в настоящем Руководстве по безопасности, дополнительные сведения справочного характера и примеры, обосновывающие сформулированные требования к проектированию. В приложении II описаны важные вопросы, которые необходимо учитывать при проектировании твэла, тепловыделяющей сборки, сборки управления реактивностью, сборки нейтронных источников и сборки гидравлических заглушек.

## **2. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА**

### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ**

2.1. Проектирование активной зоны реактора следует осуществлять с учетом рекомендаций, содержащихся в публикациях Серии норм безопасности МАГАТЭ, № GS-G-3.1, «Применение системы управления для установок и деятельности» [3] и № GS-G-3.5, «Система управления для ядерных установок» [4], а также в соответствии с требованиями 1–3 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] и требованиями публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 2, «Лидерство и менеджмент для обеспечения безопасности» [5].

### **ЦЕЛИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

#### **Фундаментальные функции безопасности**

2.2. При проектировании активной зоны реактора требуется обеспечивать выполнение в различных эксплуатационных состояниях и в широком спектре аварийных условий трех фундаментальных функций безопасности,

изложенных в требовании 4 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1]. При проектировании активной зоны реактора непосредственно применяются следующие фундаментальные функции безопасности:

- a) управление реактивностью;
- b) отвод тепла от активной зоны реактора;
- c) локализация радиоактивного материала.

### **Надлежащее проектирование на основе концепции глубокоэшелонированной защиты**

2.3. Надлежащее проектирование (т.е. разработка эффективного, безопасного и устойчивого проекта) активной зоны реактора, основанное на концепции глубокоэшелонированной защиты, позволит обеспечить выполнение фундаментальных функций безопасности и предусмотреть соответствующие средства обеспечения безопасности реактора.

2.4. К физическим барьерам, рассматриваемым при проектировании активной зоны реактора или влияющим на него, относятся топливная матрица, оболочка топлива и граница первого контура реактора. При проектировании твэлов требуется обеспечивать сохранение их конструктивной целостности и герметичности с целью предотвращения переноса продуктов деления в теплоноситель при нормальной эксплуатации и ожидаемых при эксплуатации событиях (см. требование 43 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1].

2.5. Следует предусматривать меры по сведению к минимуму повреждения оболочки твэла при проектных авариях. Компоненты активной зоны и связанные с ней конструкции следует проектировать с учетом обеспечения выполнения функций безопасности. Кроме того, требуется, чтобы активная зона реактора была спроектирована таким образом, чтобы она сохраняла конфигурацию, предусматривающую возможность останова и сохранения возможности охлаждения в случае проектных аварий и запроектных условий без существенной деградации топлива (см. требование 44 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1].

### **Апробированная инженерно-техническая практика**

2.6. Следует обеспечивать, чтобы конструкция активной зоны реактора была проверена либо в эквивалентных применениях, либо на основе опыта эксплуатации или результатов соответствующих научно-исследовательских

программ, либо, в соответствующих случаях, согласно процессам проектирования, верификации и валидации проекта, содержащимися в применимых сводах положений и нормах (см. пункты 4.14 и 4.16 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1].

### **Оценка безопасности в процессе проектирования**

2.7. Пункт 4.17 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] гласит (сноска опущена):

«Проведение оценок безопасности должно начинаться на раннем этапе процесса проектирования со взаимодействием между работами по проектированию и подтверждающему анализу и должно расширяться с точки зрения сферы охвата и повышения уровня детализации в ходе осуществления программы проектирования».

Рекомендации в отношении методов оценки безопасности содержатся в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-2 (Rev. 1), «Детерминистический анализ безопасности атомных электростанций» [6].

### **Свойства, облегчающие обращение с радиоактивными отходами**

2.8. При проектировании твэлов и тепловыделяющих сборок следует предусматривать свойства, облегчающие обращение с отходами в будущем (включая в соответствующих случаях переработку). На проектирование систем хранения и захоронения отработавшего топлива будет оказывать влияние физическое состояние тепловыделяющих сборок, выгруженных из активной зоны реактора. Рекомендации в отношении учета влияния состояния отработавшего топлива на проектирование систем для обращения с топливом и его хранения содержатся в публикациях Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-63, «Design of Fuel Handling and Storage Systems for Nuclear Power Plants» («Проектирование систем для обращения с топливом и его хранения на атомных электростанциях») [7] и № SSG-15 (Rev. 1), «Storage of Spent Nuclear Fuel» («Хранение отработавшего ядерного топлива») [8].

## **ПРОЕКТНЫЕ ОСНОВЫ КОНСТРУКЦИЙ, СИСТЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА**

2.9. Согласно требованию 14 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] необходимо, чтобы в проектных основах активной зоны реактора были указаны

требуемые возможности, надежность и функциональность во всех применимых состояниях станции (см. пункт 2.10), с тем чтобы обеспечить удовлетворение конкретных критериев приемлемости.

### **Состояния станции и постулируемые исходные события**

2.10. Как указано в требовании 13 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1], состояния станции должны быть определены и сгруппированы по категориям. Как правило, при проектировании активной зоны реактора рассматриваются следующие состояния станции: нормальная эксплуатация, ожидаемые при эксплуатации события, проектные аварии и запроектные условия без значительной деградации топлива. В настоящем Руководстве по безопасности эти четыре состояния называются «все применимые состояния станции». Аварии со значительным расплавлением активной зоны не входят в сферу охвата проектирования активной зоны реактора.

2.11. В процесс проектирования следует включать анализ влияния постулируемых исходных событий на активную зону реактора во всех применимых состояниях станции. Рекомендации в отношении определения постулируемых исходных событий во всех применимых состояниях станции и соответствующего анализа безопасности изложены в публикации SSG-2 (Rev. 1) [6].

### **Внешние опасности**

2.12. При проектировании активной зоны реактора следует принимать во внимание последствия землетрясений. Сейсмическую категоризацию КСЭ активной зоны реактора следует проводить в соответствии с положениями публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № NS-G-1.6, «Проектирование и аттестация сейсмостойких конструкций для атомных электростанций» [9].

### **Проектные пределы**

2.13. Согласно требованию 15 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] для всех применимых состояний станции должны быть определены проектные пределы по соответствующим физическим параметрам отдельных КСЭ активной зоны реактора. Соблюдение этих пределов с помощью соответствующих положений обеспечит успешное применение концепции глубокоэшелонированной защиты, сформулированной в пунктах 2.4 и 2.5, с надлежащими запасами. В пункте 3.33 и пунктах 3.65–3.67 приведены

типичные примеры соответствующих параметров и их качественных или количественных предельных значений.

### **Аспекты классификации активной зоны с точки зрения безопасности**

2.14. Требуется произвести классификацию конструкций, систем и элементов активной зоны реактора в соответствии с их функциями и значимостью с точки зрения безопасности (см. требование 22 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1]. Процесс классификации с точки зрения безопасности описан в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-30, «Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants» («Классификация конструкций, систем и элементов АЭС с точки зрения безопасности») [10].

2.15. Твэлы и тепловыделяющие сборки следует классифицировать как относящиеся к первому, наивысшему классу безопасности, поскольку они необходимы для выполнения трех фундаментальных функций безопасности, описанных в пункте 2.2.

2.16. Отказ регулирующих стержней потенциально может поставить под угрозу управление реактивностью в активной зоне и целостность твэлов, которые являются барьерами класса безопасности 1; с этой точки зрения регулирующие стержни следует классифицировать как относящиеся к классу безопасности 1.

2.17. Для всех классов безопасности, определенных в соответствии с методом, описанным в публикации SSG-30 [10], следует указывать и применять соответствующие правила технического проектирования.

### **Правила технического проектирования**

2.18. Правила технического проектирования КСЭ активной зоны реактора представляют собой методы достижения адекватности проекта, и следует обеспечивать, чтобы они в соответствующих случаях включали:

- a) использование применимых сводов положений и норм и апробированной инженерно-технической практики;
- b) консервативную оценку безопасности;
- c) анализ конкретных конструкций на надежность;
- d) аттестацию и испытания;
- e) эксплуатационные пределы и условия.

## **Проектирование с целью обеспечения надежности**

2.19. Согласно пункту 5.37 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] при проектировании твэлов и тепловыделяющих сборок, а также элементов и систем управления и останова реактора требуется обеспечивать их высокую надежность с учетом их значимости с точки зрения безопасности. Положения по обеспечению высокой надежности их конструкции изложены соответственно в пунктах 3.39 и 3.112 настоящего Руководства по безопасности.

## **Эксплуатационные пределы и условия**

2.20. Согласно требованию 28 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] для обеспечения безопасной эксплуатации активной зоны реактора в соответствии с допущениями и задачами проекта необходимо устанавливать эксплуатационные пределы и условия. Соответствующие руководящие материалы по эксплуатационным пределам и условиям содержатся в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № NS-G-2.2, «Пределы и условия для эксплуатации и эксплуатационные процедуры для атомных электростанций» [11].

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ЦЕЛЯХ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

2.21. КСЭ активной зоны реактора следует проектировать с учетом обеспечения максимального удобства при проведении их испытаний, осмотра, ремонта, замены, калибровки или технического обслуживания.

2.22. Рассмотрение и модификацию проекта активной зоны реактора следует проводить, если в течение срока эксплуатации станции происходит значительное изменение конфигурации вследствие, например:

- a) крупных модификаций проекта станции или оборудования или следующих эксплуатационных модификаций:
  - i) замены парогенератора (не для реакторов с кипящей водой);
  - ii) увеличения номинальной установленной мощности станции;
  - iii) значительного изменения рабочих параметров;
- b) внедрения нового типа топлива или значительного изменения используемого типа топлива (например, внедрения смешанного оксидного или гадолиниевого топлива, новой конструкции твэлов

или тепловыделяющих сборок с измененными геометрическими или теплогидравлическими характеристиками);

- c) увеличения глубины выгорания выгружаемого топлива по сравнению с проектным пределом;
- d) значительных изменений в обращении с топливом, таких как значительное увеличение продолжительности кампании.

2.23. При проектировании твэлов и тепловыделяющих сборок следует обеспечивать исключение отказов топлива вследствие воздействия специальных условий эксплуатации (например, изменения скорости подъема мощности, ухудшения водно-химического режима или присутствия посторонних материалов) в эксплуатационных состояниях.

## АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА

2.24. Согласно требованию 42 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] анализ безопасности необходимо проводить с целью оценки и рассмотрения вопросов безопасности во всех применимых состояниях станции, используя детерминистические подходы с максимально возможным учетом неопределенностей.

2.25. При анализе безопасности активной зоны реактора следует учитывать перечисленные ниже основные факторы:

- a) исходные условия эксплуатации (т.е. общие и локальные теплогидравлические условия, уровни мощности, распределения энерговыделения и момент кампании);
- b) обратную связь по реактивности;
- c) скорость изменения концентрации растворимого поглотителя в замедлителе и теплоносителе;
- d) положение органов или скорость введения положительной (или отрицательной) реактивности вследствие срабатывания устройства (устройств) управления реактивностью или изменений технологических параметров;
- e) скорость введения отрицательной реактивности при останове реактора;
- f) поведение каналов разной мощности (относительно средней) в переходных процессах (для кипящих реакторов);
- g) эксплуатационные характеристики оборудования систем безопасности, включая переход с одного режима работы на другой (например, с

режима впрыска для аварийного охлаждения активной зоны на режим рециркуляции);

- h) распад ксенона и других поглотителей нейтронов при анализе долгосрочного поведения активной зоны;
- i) общее содержание активности в активной зоне.

В вышеперечисленных факторах следует учитывать соответствующие условия или запасы, с тем чтобы обеспечить возможность применения анализа безопасности для конкретных картограмм топливной загрузки или конструкций топлива. Рекомендации по методам проведения анализа безопасности содержатся в публикации SSG-2 (Rev. 1) [6].

2.26. Для того чтобы подтвердить непревышение проектных пределов по ядерному топливу во всех применимых состояниях станции, следует провести анализ безопасности активной зоны реактора. Для аварийных условий следует включать в анализ безопасности влияние поведения топлива на охлаждение активной зоны (например, раздутие и разрушение оболочки твэла, экзотермические реакции между металлом и водой и искривление твэлов и тепловыделяющих сборок). Следует оценивать влияние накопления водорода (вследствие реакции между водой и оболочкой из циркониевого сплава при высоких температурах) на границу первого контура реактора.

2.27. Следует вести систематическую, полную, квалифицированную и актуальную документацию о состоянии КСЭ станции и активной зоны реактора, регулярно актуализировать эту документацию, с тем чтобы обеспечить выполнение анализа безопасности с использованием реальной конфигурации станции и активной зоны.

### **3. КОНКРЕТНЫЕ СВЯЗАННЫЕ С БЕЗОПАСНОСТЬЮ СООБРАЖЕНИЯ, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА**

#### **ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

3.1. В данном разделе рассматриваются конкретные аспекты проектирования КСЭ активной зоны реактора, учитываемые для выполнения требований 43–46, установленных в публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1]. В нем также рассмотрено взаимодействие с управлением активной зоной, которое в значительной мере влияет на проектирование активной зоны в части эксплуатационных характеристик твэлов и тепловыделяющих сборок. Конкретные руководящие материалы представлены в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № NS-G-2.5, «Управление активной зоной и обращение с топливом на атомных электростанциях» [12].

3.2. Следует обеспечивать, чтобы проект активной зоны реактора в сочетании с проектом систем охлаждения реактора и систем управления и защиты реактора позволяли выполнять на постоянной основе фундаментальные функции безопасности (пункт 2.2) во всех применимых состояниях станции (т.е. в режиме нормальной эксплуатации, в случае ожидаемых при эксплуатации событий, при проектных авариях и запроектных условиях без значительной деградации топлива).

3.3. Активную зону реактора и связанные с ней системы управления и защиты следует проектировать с достаточными запасами для обеспечения непревышения проектных пределов по ядерному топливу во всех применимых состояниях станции. Проектные пределы по ядерному топливу описываются в пунктах 3.65–3.76.

#### **Тип топлива**

3.4. Твэлы содержат делящиеся материалы (например,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ), которые весьма активно вступают в реакцию с тепловыми нейтронами. При выборе материалов топливных таблеток следует оптимизировать указанные

ниже характеристики (примеры материалов, используемых в топливных таблетках, приведены в приложении I):

- a) способность вступать в реакцию с тепловыми нейтронами;
- b) примеси с низкими свойствами поглощения тепловых нейтронов;
- c) тепловые характеристики (например, для режимов эксплуатации желательна высокая теплопроводность, а для аварийных условий — высокая способность рассеивать тепло);
- d) стабильность геометрических параметров;
- e) удержание газообразных продуктов деления;
- f) устойчивость к явлениям, возникающим при взаимодействии материалов топлива и оболочки твэла.

3.5. Материалы оболочки твэла следует выбирать с учетом указанные ниже характеристик (примеры материалов оболочки твэла приведены в приложении I):

- a) низкое сечение поглощения тепловых нейтронов;
- b) высокая устойчивость к воздействию условий облучения;
- c) высокая теплопроводность и высокая температура плавления;
- d) высокая коррозионная стойкость и низкий уровень наводороживания;
- e) низкие окисляемость и наводороживание в условиях высоких температур;
- f) достаточная стойкость к разрушающему окислению в условиях длительного пребывания при высоких температурах;
- g) надлежащие механические свойства (например, высокая прочность, высокая пластичность, низкая ползучесть в условиях нормальной эксплуатации и высокая скорость релаксации в переходных режимах);
- h) низкая подверженность коррозионному растрескиванию под напряжением;
- i) надлежащая устойчивость к водородному и гидридным растрескиванию при нормальной эксплуатации и при хранении топлива.

## **Теплоноситель**

3.6. В легководных реакторах теплоноситель выполняет также функцию замедлителя. При выборе теплоносителя следует учитывать взаимодействия теплоносителя с компонентами топлива и активной зоны при всех химических условиях (дополнительную информацию см. в приложении I). В тяжеловодных реакторах с водой под давлением теплоноситель и

замедлитель разделены; как правило, для управления реактивностью химические реагенты в теплоноситель не добавляются.

3.7. Для выполнения основной функции теплоносителя, а именно постоянного отвода тепла из активной зоны, следует обеспечивать его химическую и физическую устойчивость к воздействию как высоких температур, так и облучения.

3.8. Активную зону реактора следует проектировать таким образом, чтобы предотвращались или контролировались неустойчивости потока и вызываемые ими колебания реактивности активной зоны или энерговыделения.

3.9. При проектировании топлива и активной зоны следует учитывать указанные ниже соображения безопасности, связанные с теплоносителем:

- a) обеспечение отсутствия посторонних материалов в системе теплоносителя перед первым пуском реактора и после остановов для перегрузки топлива и ремонта в течение всего срока эксплуатации станции;
- b) поддержание радионуклидной активности теплоносителя на разумно достижимом низком уровне с помощью систем очистки, минимизация количества коррозионных продуктов или удаление дефектного топлива по мере необходимости;
- c) мониторинг и контроль воздействия теплоносителя и добавляемых в него присадок на реактивность во всех состояниях станции;
- d) определение и контроль физических и химических свойств теплоносителя в активной зоне;
- e) обеспечение совместимости химического состава теплоносителя с материалами, присутствующими в первом контуре (например, для предотвращения образования отложений на ТВЭлах и сведения к минимуму коррозии и образования радиоактивных продуктов).

3.10. При проектировании следует учитывать влияние, оказываемое изменениями плотности теплоносителя (включая фазовые изменения теплоносителя) на реактивность и мощность активной зоны как локально, так и в масштабе всей активной зоны.

## **Замедлитель**

3.11. Следует обеспечивать, чтобы выбор замедлителя и шаг размещения в нем твэлов отвечали инженерно-техническим требованиям и требованиям безопасности в отношении обратной связи по реактивности вследствие изменений температуры замедлителя, его плотности и паросодержания при одновременной оптимизации баланса нейтронов и, следовательно, расхода топлива. В большинстве типов реакторов на тепловых нейтронах в качестве замедляющей среды используется легкая или тяжелая вода.

3.12. В зависимости от проекта реактора замедлитель может содержать растворимый поглотитель нейтронов, например бор в реакторах с водой под давлением, для того чтобы обеспечить необходимые значения запаса подкритичности во всех эксплуатационных состояниях и путем регулируемого растворения компенсировать уменьшение реактивности активной зоны в течение всей кампании.

3.13. В реакторах с тяжелой водой под давлением следует предусматривать, чтобы конструкция активной зоны реактора обеспечивала эффективное срабатывание системы останова реактора при авариях, связанных со снижением концентрации поглотителя. Следует предусматривать средства для предотвращения непреднамеренного удаления такого поглощающего материала (например, вследствие химических переходных процессов) и обеспечения контролируемого и постепенного характера его удаления.

3.14. В реакторах с тяжелой водой под давлением следует предусматривать, чтобы замедлитель обеспечивал возможность отвода остаточного тепловыделения без нарушения геометрии активной зоны в аварийных условиях.

3.15. В реакторах с тяжелой водой под давлением следует предусматривать меры для предотвращения возгорания или взрыва водорода, образующегося в замедлителе в результате радиолиза.

## **НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

### **Соображения, касающиеся проектирования**

3.16. 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 нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора (дополнительную информацию см. в приложении I), ее теплогидравлических характеристик, а также способности системы управления и системы останова срабатывать во всех применимых состояниях станции.

3.17. Следует предусматривать, чтобы проект обеспечивал надежное и незамедлительное обнаружение и подавление изменений мощности, которые могут приводить к возникновению условий, превышающих проектные пределы по ядерному топливу при нормальной эксплуатации и ожидаемых при эксплуатации событиях.

### **Нейтронно-физические проектные пределы**

#### *Ключевые параметры ядерной безопасности*

3.18. Ключевые параметры ядерной безопасности, влияющие на нейтронно-физическое проектирование активной зоны и стратегии обращения с топливом, следует устанавливать на основе анализа безопасности, подтверждающего соответствие конкретным проектным пределам по ядерному топливу, описанным в пунктах 3.65–3.76. Следует также предусматривать соответствующие ключевые параметры ядерной безопасности таким образом, чтобы они оставались актуальными для конкретных проектов перезагрузки активной зоны и на протяжении кампании. Как правило, к ключевым параметрам ядерной безопасности относятся:

- a) температурные коэффициенты реактивности теплоносителя и замедлителя;
- b) борный коэффициент реактивности и концентрация бора (для легководных реакторов с водой под давлением);
- c) запас подкритичности;
- d) максимальная скорость ввода реактивности;
- e) эффективность одного ПС СУЗ и группы ПС СУЗ;
- f) коэффициенты неравномерности энерговыделения по высоте и радиусу активной зоны с учетом допусков на вызываемые ксеноном колебания;
- g) максимальная линейная мощность энерговыделения;
- h) паровой (пустотный) коэффициент реактивности.

3.19. При любых значительных изменениях проекта активной зоны реактора (см. пункт 2.22) их влияние на безопасность следует оценивать, используя ключевые параметры ядерной безопасности, с целью обеспечения соблюдения установленных проектных пределов по ядерному топливу. В противном случае следует определять и обосновывать новые ключевые параметры ядерной безопасности.

#### *Характеристики реактивности активной зоны*

3.20. Исходя из геометрии и состава топлива активной зоны реактора, в проект следует включать оценки активной зоны с целью определения стационарных пространственных распределений нейтронного потока и энерговыделения, нейтронно-физических характеристик активной зоны и эффективности средств управления реактивностью в условиях нормальной эксплуатации станции на мощности, в условиях останова и в аварийных условиях.

3.21. Следует производить оценку ключевых параметров ядерной безопасности, таких как коэффициенты реактивности, для выбранных условий эксплуатации активной зоны (например, нулевой мощности, полной мощности, начала цикла, конца цикла и ключевых точек, связанных с выгоранием поглотителя) и для соответствующей стратегии управления топливом. Следует проанализировать зависимость таких ключевых параметров ядерной безопасности от загрузки активной зоны и от выгорания топлива. Соответствующие запасы следует включать в коэффициенты реактивности или в подходы к моделированию, используемые с целью оценки обратной связи по реактивности при анализе безопасности для всех применимых состояний станции.

#### *Максимальная эффективность и скорость ввода реактивности*

3.22. Следует ограничивать максимальную эффективность устройств управления реактивностью (например, регулирующих стержней и/или систем контроля воднохимического режима) или предусматривать системы блокировки, с тем чтобы любые результирующие изменения уровня мощности не превышали пределы, установленные для соответствующих переходных режимов и аварий, вызванных ростом реактивности, таких как:

- a) выброс регулирующего стержня;
- b) падение регулирующего стержня;

- c) разбавление борного поглотителя;
- d) неконтролируемое извлечение групп регулирующих стержней.

Такие пределы реактивности следует определять путем анализа безопасности с целью обеспечения непревышения проектных пределов по ядерному топливу, описанных в пунктах 3.65–3.76. Этот анализ следует проводить для всех видов топлива в активной зоне (например, топлива на основе  $UO_2$  или смешанного оксидного топлива) или репрезентативной активной зоны с соответствующими запасами, а также для всех допустимых условий эксплуатации и значений выгорания ядерного топлива.

#### *Регулирование общей и локальной мощности*

3.23. В проекте следует предусматривать возможность общего и локального управления мощностью активной зоны с помощью средств управления реактивностью (дополнительную информацию см. в приложении I) таким образом, чтобы пиковое линейное энерговыделение каждого твэла не превышало проектных пределов в любой точке активной зоны. При проектировании системы управления следует учитывать изменения в распределении энерговыделения (например, вызываемые такими эффектами, как ксеноновая нестабильность) или другие локальные эффекты (например, вызываемые коррозионными отложениями скачки мощности в смешанной активной зоне или аномалии с осевым сдвигом в легководных реакторах с водой под давлением, прогиб или искривление тепловыделяющих сборок). Следует предусматривать необходимость учета расхождений показаний датчиков потока (например, вследствие различий в работоспособности, местоположении, экранировании или старении).

#### *Запас подкритичности*

3.24. Следует предусматривать, чтобы введение регулирующих стержней обеспечивало надлежащий запас подкритичности во всех применимых состояниях станции (дополнительную информацию см. в приложении I). Следует предусматривать, чтобы задание и мониторинг пределов введения регулирующих стержней в зависимости от уровня мощности гарантировали надлежащий запас подкритичности в любое время с целью обеспечения удовлетворительной отказоустойчивости.

3.25. С целью обеспечения достаточного запаса подкритичности во всех возникающих применимых состояниях активной зоны в течение всего эксплуатационного цикла следует оценивать степень влияния истощения

выгорающего поглотителя на реактивность активной зоны. (Примеры использования выгорающих поглотителей в легководных реакторах с водой под давлением представлены в приложении I.)

## ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

### **Соображения, касающиеся проектирования**

3.26. При теплогидравлическом проектировании активной зоны реактора следует предусматривать надлежащие запасы и меры с целью обеспечения:

- a) не превышения установленных проектных теплогидравлических пределов в эксплуатационных состояниях (т.е. при нормальной эксплуатации и в случае ожидаемых при эксплуатации событий);
- b) удержания в пределах допустимых уровней интенсивностей отказов твэлов при проектных авариях и запроектных условиях без значительной деградации топлива;
- c) соответствия минимальных и максимальных значений расхода теплоносителя через активную зону теплогидравлическим проектным пределам и механическим проектным пределам.

### **Теплогидравлические проектные пределы**

3.27. Для таких прогнозируемых параметров, как максимальная линейная мощность, минимальный коэффициент критической мощности (для кипящих реакторов), минимальный запас до кризиса кипения (для реакторов с водой под давлением) или коэффициент запаса по мощности до кризиса высыхания (для тяжеловодных реакторов с водой под давлением), пиковая температура топлива или энтальпия и пиковая температура оболочки твэла, следует устанавливать конкретные теплогидравлические проектные пределы с надлежащими запасами. При анализе проекта следует учитывать неопределенности значений технологических параметров (например, мощности реактора, расхода теплоносителя, расхода в байпас активной зоны, значений температуры и давления на входе в активную зону, коэффициентов неравномерности энерговыделения в активной зоне), проектных параметров активной зоны и методов расчета, использованных при оценке запасов по тепловым нагрузкам.

3.28. В теплогидравлическое проектирование следует включать анализ проекта, учитывающий конструктивные особенности тепловыделяющей

сборки, включая расстояние между твэлами, их мощность, размеры и форму ячеек тепловыделяющей сборки, дистанционирующих и перемешивающих решеток (для легководных реакторов) и дефлекторов потока (для легководных реакторов) или турбулентных активаторов. Кроме того, в случае тяжеловодных реакторов с водой под давлением канального типа при анализе проекта следует учитывать: влияние подвесок пучков тепловыделяющих сборок, геометрию выступающих элементов, величину зазора между твэлами и топливным каналом, ожидаемую деформацию топливных каналов при старении реактора и соединений соседних опорных пластин.

3.29. В случае легководных реакторов при теплогидравлическом проектировании следует также учитывать температуру теплоносителя на входе в активную зону и на выходе из нее и распределения расхода. Эти явления следует также учитывать в системах мониторинга и защиты активной зоны.

3.30. При проектировании следует обеспечивать, чтобы минимальное отношение эксплуатационной мощности к критической мощности (т.е. минимальные значения коэффициента запаса до кризиса теплового потока, коэффициента запаса до кризиса кипения, коэффициента критической мощности в канале или коэффициента критической мощности) устанавливалось с учетом корреляций условий критического теплового потока, полученных на основе репрезентативных испытаний, проведенных в стационарных условиях. Соответственно, к минимальным значениям коэффициентов следует добавлять дополнительные запасы или поправки, не учтенные в самой корреляции, такие как следующие:

- a) реакции теплогидравлической системы на ожидаемые при эксплуатации события;
- b) влияние выбранной картограммы топливной загрузки;
- c) влияние потенциального присутствия продуктов коррозии в активной зоне.

Кроме того, при анализе безопасности следует надлежащим образом учитывать неопределенности, такие как неопределенности, связанные с эксплуатацией станции или используемыми расчетными кодами.

3.31. При анализе безопасности следует применять предельные значения коэффициента запаса до кризиса теплового потока, с тем чтобы исключить возможность разрушения оболочки твэла. В некоторых проектах реакторных

установок допустимо наличие критических условий теплообмена во время переходных процессов, если с использованием соответствующих аналитических методов может быть показано, что температура оболочки твэла не превышает пределов, при которых начинается разрушение топлива.

3.32. Для определения минимальных значений коэффициентов необходимо провести экспериментальные исследования поведения репрезентативных конструкций тепловыделяющих сборок во всем диапазоне ожидаемых эксплуатационных состояний, в том числе в различных условиях аксиального энерговыделения. Корреляции для прогнозирования условий возникновения кризиса теплообмена формируются постоянно вследствие поступления новых экспериментальных данных, изменений конструкции тепловыделяющих сборок и использования все более совершенных методик расчета, учитывающих перемешивание теплоносителя и влияние распределения энерговыделения по высоте активной зоны. Следует оценивать влияние любого изменения на корреляцию, используемую при теплогидравлическом проектировании. В случае быстропротекающих переходных процессов (например, аварий вследствие выброса регулирующего стержня) возможно проведение повторной оценки использованных корреляций, поскольку стационарные условия могут быть недостаточно репрезентативными.

3.33. Подходы, которые следует использовать для демонстрации выполнения рекомендаций, изложенных в пунктах 3.27–3.32, приведены ниже:

- a) для реакторов с водой под давлением предельное (минимальное) значение коэффициента запаса до кризиса кипения следует устанавливать на уровне, при котором не происходит ухудшения теплообмена при нормальной эксплуатации или ожидаемых при эксплуатации событиях с вероятностью 95% и с уровнем достоверности 95%;
- b) для кипящих реакторов и некоторых реакторов с водой под давлением, которые не соответствуют рекомендации, изложенной в пункте 3.33 (а), предельное (минимальное) значение коэффициента критической мощности, коэффициента запаса до кризиса теплового потока или коэффициента запаса до кризиса кипения следует устанавливать на уровне, при котором количество твэлов, в которых происходит ухудшение теплообмена, не превышает очень незначительной доли (например, максимум 0,1%) от общего числа твэлов в активной зоне;

- с) для тяжеловодных реакторов с водой под давлением, если максимальная температура оболочки твэла находится ниже определенного предела (например, 600°C) и продолжительность пребывания в закризисном режиме теплообмена ограничена (например, менее 60 с), считается, что деформация топлива невелика и твэлы не соприкасаются со стенками топливного канала и не вызовут его повреждения.

## ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТВЭЛОВ И ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК

### **Соображения, касающиеся проектирования**

3.34. Следует предусматривать, чтобы проект обеспечивал поддержание конструктивной целостности тепловыделяющих сборок (т.е. их геометрии) и твэлов (т.е. их герметичности) при нормальной эксплуатации и ожидаемых при эксплуатации событиях. В тех случаях, когда это разумно обосновано и практически достижимо, следует обеспечивать, чтобы в условиях аварий (проектных аварий и запроектных условий без значительной деградации топлива) проект обеспечивал исключение повреждения твэлов, а если это невозможно, допускал повреждение только ограниченного их количества. Величина допустимого количества поврежденных твэлов зависит от частоты возникновения и характера события. При проектировании следует обеспечивать сохранение охлаждаемой геометрии активной зоны в условиях проектных аварий и запроектных условий без значительной деградации топлива. В аварийных условиях следует оценивать уровень активности радионуклидов для подтверждения того, что не превышены дозовые пределы для работников.

3.35. Для аварийных условий, включающих раздутие и разрушение оболочки твэла, следует предотвращать попадание фрагментов топлива в теплоноситель.

3.36. При проектировании твэлов (с выгорающим поглотителем или без него) и тепловыделяющих сборок следует учитывать радиационную обстановку и условия эксплуатации (например, температуру; давление; химический состав теплоносителя; влияние облучения на топливо, его оболочку и тепловыделяющие сборки; статические и механические нагрузки, включая вибрацию в результате воздействия потока; и изменения химических характеристик материалов, входящих в состав компонентов).

3.37. При проектировании твэлов и тепловыделяющих сборок следует учитывать нагрузки, испытываемые ими в ходе операций транспортировки, хранения, установки и перегрузки топлива.

3.38. В приложении II содержится описание важных аспектов, которые, как правило, учитываются при проектировании твэлов и тепловыделяющих сборок, а также сборок системы управления реактивностью, сборок нейтронных источников и сборок гидравлических заглушек, в том числе условий облучения и эксплуатации.

3.39. При проектировании следует предусматривать обеспечение надежности твэлов и тепловыделяющих сборок в течение всего их срока службы, в том числе во время изготовления, транспортировки, обращения, эксплуатации внутри активной зоны, хранения и захоронения, где это применимо. Следует учитывать ключевые факторы, обуславливающие надежность топлива; наиболее важными из них являются:

- a) надзор за изготовлением топлива;
- b) смягчение воздействия посторонних предметов (исключение посторонних материалов);
- c) контроль за изменением мощности реактора с целью ограничения избыточного взаимодействия между материалами топливных таблеток и оболочки твэла;
- d) контроль коррозионных отложений и коррозии;
- e) предотвращение фреттинг-коррозии между решеткой и твэлами (для легководных реакторов);
- f) практика контроля и инспекций топлива.

#### *Тепловые эффекты и эффекты выгорания твэлов*

3.40. Следует предусматривать, чтобы проект обеспечивал, что в эксплуатационных состояниях пиковая температура топлива остается ниже температуры плавления топлива с надлежащим запасом, с тем чтобы предотвращать расплавление топлива с учетом соответствующих условий и неопределенностей. В случае проектных аварий (например, аварий, вызванных ростом реактивности) и запроектных условий без значительной деградации топлива может быть допустима начальная стадия расплавления топлива (например, незначительное расплавление центрального участка топливных таблеток, составляющего малую часть всего их объема). При проведении проектных оценок и оценок безопасности следует учитывать

влияние выгорания топлива на свойства твэлов и тепловыделяющих сборок (дополнительную информацию см. в приложении I).

3.41. Причинами деформации оболочки твэла являются избыточное давление газов внутри твэла или газовое раздутие топлива или тепловое расширение топлива вследствие выгорания топлива или локального увеличения мощности. При проектировании следует обеспечивать ограничение напряжений и деформаций оболочки твэла. Для всех применимых состояний станции следует устанавливать пределы напряжений для оболочки твэла, совокупной деформации оболочки твэла, а также коррозии и наводороживания оболочки твэла и их следует применять на протяжении всей кампании.

3.42. В случае аварийных условий следует производить оценку деформации оболочки твэла с целью определения потенциальной возможности ее повреждения (т.е. пробоя или разрыва), ведущего к выходу продуктов деления из топлива.

#### *Влияние облучения на конструкции тепловыделяющей сборки*

3.43. При проектировании следует обеспечивать, чтобы изменения размеров конструкций тепловыделяющих сборок легководных реакторов сводились к минимуму с целью предотвращения контактов или взаимодействий между твэлами и компонентами тепловыделяющей сборки (головкой и хвостовиком тепловыделяющей сборки) и чтобы прогиб твэлов и тепловыделяющих сборок, а также распухание регулирующих стержней и любое возможное взаимодействие с направляющими каналами тепловыделяющей сборки не оказывали влияния на конструктивную целостность и теплогидравлические характеристики тепловыделяющих сборок или на функции безопасности регулирующих стержней.

3.44. Следует оценивать релаксацию пружин каркаса тепловыделяющих сборок под воздействием радиации, с тем чтобы ограничивать возможность развития фреттинг-коррозии между решеткой и твэлами (для легководных реакторов). При анализе стабильности геометрических размеров компонентов тепловыделяющих сборок и устройств управления следует учитывать влияние облучения, в частности, быстрыми нейтронами, на механические свойства, такие как прочность при растяжении, пластичность, распухание, ползучесть или релаксация. При оценке сейсмических событий или аварий с потерей теплоносителя следует учитывать влияние

облучения на устойчивость дистанционирующих решеток в отношении продольного изгиба.

3.45. Для тяжеловодных реакторов с водой под давлением при проектировании следует обеспечивать, чтобы длина полости технологического канала была достаточной для компенсации радиационных и тепловых воздействий на подвеску пучка тепловыделяющих сборок в технологическом канале во всех применимых состояниях станции.

#### *Влияние изменений уровней мощности*

3.46. Для эксплуатационных состояний проектирование твэлов следует осуществлять с учетом условий эксплуатации и необходимости выдерживать термомеханические нагрузки, возникающие при локальных и общих переходных процессах мощности (например, нагрузок при перемещении тепловыделяющей сборки в активной зоне, перемещении устройств регулирования, в режиме следования за нагрузкой, режиме переменной нагрузки или вследствие других причин изменений реактивности).

#### *Механические воздействия на твэлы*

3.47. В проектирование следует включать анализ, проводимый с целью обеспечения соответствия деформации оболочки твэла под влиянием механических воздействий (например, давления теплоносителя, сейсмических нагрузок) проектным пределам по ядерному топливу. В этом анализе следует учитывать кинетику закрытия радиального зазора, зависящую от различных параметров, таких как уплотнение ядерного топлива, его распухание, растрескивание топливных таблеток и радиальное перемещение их осколков внутри твэла после изменения мощности, характеристики ползучести оболочки твэла при малых напряжениях, начальное внутреннее давление в твэлах, выход газообразных продуктов деления в свободные объемы и эксплуатационные параметры, включая историю изменения мощности и давление теплоносителя.

3.48. Следует предотвращать коррозионное растрескивание, вызываемое взаимодействием материалов таблетки с оболочкой в присутствии коррозионных продуктов деления (дополнительную информацию см. в приложении I).

3.49. Концентрация напряжений в оболочке, вызванная отсутствием таблеток, осевыми зазорами между топливными таблетками, отсутствием

поверхностей таблеток или попаданием в зазор осколков топливных таблеток, не может быть явно учтена при проектировании ТВЭЛОВ, поэтому таких аномалий следует в максимально возможной степени избегать.

#### *Влияние выгорающих поглотителей в ТВЭлах*

3.50. При проектировании следует производить соответствующие анализы с целью демонстрации способности ТВЭла выдерживать влияние содержащихся в топливе выгорающих поглотителей на тепловые, механические, химические и микроструктурные свойства топливных таблеток, а также на поведение ТВЭЛОВ.

#### *Коррозия и наводороживание*

3.51. Для всех типов оболочек следует определять корреляции наводороживания как функцию коррозии оболочки ТВЭла при нормальной эксплуатации, с тем чтобы иметь возможность выразить соответствующие проектные пределы по ядерному топливу, такие как пределы, установленные для аварий, вызванных ростом реактивности, или аварий с потерей теплоносителя, как функцию содержания водорода в оболочке ТВЭла перед началом переходного режима (дополнительную информацию см. в приложении I).

3.52. При проектировании ТВЭЛОВ и тепловыделяющих сборок следует обеспечивать их совместимость со средой теплоносителя в эксплуатационных состояниях, включая останов и перегрузку топлива (дополнительную информацию см. в приложении I).

3.53. Для тяжеловодных реакторов с водой под давлением следует ограничивать начальное содержание водорода в ТВЭлах, с тем чтобы уменьшить вероятность возникновения дефектов топлива, вызванных охрупчиванием оболочки ТВЭла под воздействием водорода.

#### *Продукты коррозии*

3.54. При проведении проектных анализов следует учитывать деградацию теплопередачи от ТВЭЛОВ вследствие формирования отложений на поверхности оболочки ТВЭла, вызванного поступающими из системы теплоносителя реактора продуктами коррозии, или других химических изменений. Для реакторов с водой под давлением в случае захвата бора на слое продуктов коррозии при анализе проекта активной зоны следует

оценивать и учитывать потенциальное влияние этого явления на нейтронно-физические характеристики активной зоны.

#### *Гидравлические эффекты в тепловыделяющих сборках*

3.55. Гидравлические эффекты следует рассматривать прежде всего при теплогидравлическом проектировании тепловыделяющей сборки, а также при оценке таких аспектов, как локализованная коррозия, эрозия, вибрации под воздействием потока, фреттинг-коррозия между решеткой и твэлами, всплывание тепловыделяющей сборки и искривление тепловыделяющей сборки. Гидравлические воздействия на конструкцию тепловыделяющей сборки следует охарактеризовывать путем проведения ресурсных испытаний тепловыделяющих сборок на аттестованных стендах с использованием полномасштабных макетов тепловыделяющих сборок с прототипными условиями испытаний (т.е. давлением, температурой, поперечными потоками и релаксацией пружин решетки в конце срока службы).

#### *Учет механической безопасности при проектировании*

3.56. Тепловыделяющую сборку следует проектировать таким образом, чтобы она выдерживала механические напряжения, возникающие вследствие:

- a) обращения с топливом и его загрузки;
- b) изменений мощности;
- c) прижимных нагрузок в реакторах с водой под давлением (которые должны уравнивать гидродинамические подъемные силы и геометрические изменения шахты реактора и тепловыделяющих сборок при облучении);
- d) перепадов температуры;
- e) воздействия гидравлических сил, в том числе поперечных потоков между искривленными тепловыделяющими сборками и при смешанных конфигурациях топлива в активной зоне (т.е. в активных зонах, в которых используется топливо различных типов);
- f) влияния облучения (например, радиационно-индуцированного роста и распухания);
- g) вибрационного и коррозионного износа твэлов (фреттинг-коррозии между решеткой и твэлами в легководных реакторах, износа дистанционирующих элементов в тяжеловодных реакторах с водой под давлением), индуцированного потоком теплоносителя;

- h) деформации ползучести конструкции тепловыделяющей сборки (которая может привести к ее искривлению);
- i) сейсмических нагрузок на уровне максимального расчетного землетрясения, которые, как правило, сочетаются с нагрузками, вызываемыми авариями с потерей теплоносителя;
- j) постулируемых исходных событий (т.е. ожидаемых при эксплуатации событий и проектных аварий), а также запроектных условий без значительной деградации топлива.

3.57. При проектировании твэлов и тепловыделяющих сборок для всех применимых состояний станции следует рассматривать перечисленные ниже аспекты механической безопасности:

- a) следует обеспечивать, чтобы зазор внутри тепловыделяющей сборки и вокруг нее был достаточен для компенсации радиационно-индуцированного роста и прогиба (в легководных реакторах) и раздутия топливного канала (в кипящих реакторах) (дополнительную информацию см. в приложении II);
- b) следует ограничивать прогиб твэлов или искривление тепловыделяющих сборок, с тем чтобы не оказывалось отрицательного воздействия на теплогидравлические характеристики, распределение мощности, поведение ядерного топлива и обращение с топливом;
- c) следует обеспечивать, чтобы усталость материала не являлась причиной отказа какого-либо компонента тепловыделяющей сборки;
- d) величину искривления тепловыделяющей сборки вследствие воздействия на нее механических или гидравлических прижимных сил и поперечных потоков в активной зоне следует ограничивать значением, не влияющим на локальный запас по критическому тепловому потоку. Кроме того, следует обеспечивать, чтобы искривление тепловыделяющей сборки не препятствовало вводу ПС СУЗ (т.е. не следует допускать увеличения времени падения в реакторах с водой под давлением) для обеспечения безопасного останова реактора во всех применимых состояниях станции (для легководных реакторов);
- e) следует обеспечивать, чтобы повреждения, вызванные вибрацией и коррозионным износом, не влияли на общую функциональную работоспособность тепловыделяющей сборки и ее опорной конструкции;
- f) следует обеспечивать, чтобы гидравлические или механические нагрузки (в том числе возникающие при максимальном расчетном землетрясении) не приводили к отказу какого-либо компонента тепловыделяющей сборки.

3.58. Следует обеспечивать, чтобы в условиях аварий (проектных аварий и запроектных условий без значительной деградации топлива) проект предотвращал любое взаимодействие между твэлами или тепловыделяющими сборками и опорными конструкциями тепловыделяющих сборок, которое может затруднить выполнение системами безопасности своих функций, указанных в анализе безопасности. В частности, следует обеспечивать:

- a) надлежащее функционирование компонентов систем безопасности (например, устройств останова и их направляющих труб в реакторах с водой под давлением);
- b) надлежащее охлаждение активной зоны.

*Взаимодействие топливной таблетки с оболочкой твэла*

3.59. При проектировании следует обеспечивать невозможность повреждения оболочки твэла вследствие механического взаимодействия топливных таблеток с оболочкой твэла в условиях нормальной эксплуатации и при ожидаемых при эксплуатации событиях (дополнительную информацию см. в приложении I). Следует предусматривать, чтобы конструкция твэлов и имеющиеся на конкретной станции руководства по изменению мощности в условиях нормальной эксплуатации и при ожидаемых при эксплуатации событиях обеспечивали предотвращение избыточного механического взаимодействия топливных таблеток с оболочкой твэла.

3.60. Во время проектных аварий, ведущих к режимам с быстрыми изменениями мощности (например, при авариях, вызванных ростом реактивности), возможно повреждение оболочки твэла вследствие избыточного механического взаимодействия таблеток с оболочкой твэла в сочетании с охрупчиванием оболочки твэла вследствие внутриреакторного наводороживания при глубоком выгорании. При анализе безопасности следует рассматривать отказы топлива, соответствующие этому виду отказов.

3.61. При проектировании следует обеспечивать минимизацию коррозионного растрескивания оболочки твэла под напряжением в условиях нормальной эксплуатации и при ожидаемых при эксплуатации событиях (дополнительную информацию см. в приложении I).

3.62. Коррозионное растрескивание оболочки твэла под напряжением следует предупреждать путем применения надлежащих методов проектирования, таких как приведенные в перечисленных ниже примерах:

- a) уменьшение растягивающих напряжений в оболочке топлива путем ограничения скорости изменения мощности (дающего возможность релаксации напряжений в оболочке) или путем задержки закрытия зазора между топливными таблетками и оболочкой твэла (это может быть достигнуто путем увеличения начального давления газа в твэле или оптимизации характеристик ползучести оболочки твэла);
- b) снижение коррозионного воздействия выделяемых таблетками продуктов деления (например, йода, кадмия, цезия), обеспечиваемое путем использования облицовки (в кипящих реакторах) или графитового покрытия (в тяжеловодных реакторах с водой под давлением), которые менее подвержены коррозионному воздействию на внутреннюю поверхность оболочки твэла. Такая облицовка может также выравнивать локальные концентрации напряжений в оболочке твэла;
- c) уменьшение доступности коррозионных продуктов деления на поверхности раздела между таблеткой и оболочкой твэла путем использования топливных присадок, улучшающих способность топлива удерживать коррозионные продукты деления внутри топливной матрицы;
- d) снижение локальных коэффициентов неравномерности энерговыделения (и тем самым локальных изменений линейного энерговыделения) посредством применения методов проектирования активной зоны.

3.63. Пороговое значение отказа при скачкообразном изменении мощности следует устанавливать в соответствующих случаях путем проведения на испытательных реакторах испытаний со скачкообразным изменением мощности реактора для каждого типа топлива или оболочки твэла. Следует обеспечивать, чтобы собранные данные охватывали весь диапазон выгорания топлива (дополнительную информацию см. в приложении I).

3.64. Для анализа и интерпретации данных, полученных по результатам испытаний со скачкообразным изменением мощности, и определения порогового значения отказа при скачкообразном изменении мощности можно использовать расчетные коды для оценки характеристик топлива. Как правило, для определения этого значения используется максимальное напряжение оболочки твэла, однако можно также использовать

плотность энергии деформации. Те же самые расчетные коды для оценки характеристик топлива можно использовать для оценки факторов риска, вызывающих данный тип коррозионного растрескивания под напряжением твэлов в активной зоне реактора, а также для разработки надлежащих руководств по исключению этих факторов.

### **Проектные пределы по ядерному топливу**

3.65. Проектные пределы по ядерному топливу следует устанавливать на основе всех физических, химических и механических процессов, влияющих на эксплуатацию твэлов и тепловыделяющих сборок во всех применимых состояниях станции.

#### *Проектные пределы для эксплуатационных состояний*

3.66. Для нормальной эксплуатации и ожидаемых при эксплуатации событий при проектировании твэлов следует учитывать на протяжении всей кампании как минимум приведенные ниже ограничения:

- a) в любой точке внутри топливных таблеток не должно происходить расплавления;
- b) недопустимость перегрева оболочки твэла (т.е. отсутствие кризиса кипения в реакторах с водой под давлением, снижения коэффициента критической мощности ниже предела в кипящих реакторах и отсутствие условий для кризиса высыхания в тяжеловодных реакторах с водой под давлением);
- c) не должно происходить схлопывания оболочки твэла (только для топлива легководных реакторов);
- d) не должно происходить увеличения давления внутри твэлов до значений, вызывающих деформацию оболочки твэла, ведущую к ухудшению теплообмена между топливными таблетками и теплоносителем (т.е. не должно происходить повторного возникновения зазора между топливными таблетками и оболочкой твэла вследствие отрыва оболочки твэла от топливного сердечника);
- e) не должно происходить превышения установленных пределов для коррозии и наводороживания оболочки твэла;
- f) напряжение и деформация оболочки твэла должны удерживаться на уровнях ниже установленных пределов;
- g) уменьшение толщины стенки оболочки твэла (например, вследствие износа или эрозии) не должно превышать установленные пределы.

3.67. Компоненты твэлов и тепловыделяющих сборок следует проектировать таким образом, чтобы сохранять на низком уровне их деформации и увеличение размера и обеспечивать:

- а) отсутствие геометрического взаимодействия твэлов с хвостовиками и головками тепловыделяющих сборок (для предотвращения прогиба твэлов и тепловыделяющих сборок легководных реакторов). Отсутствие геометрического взаимодействия между подвеской пучка твэлов и защитными пробками (в тяжеловодных реакторах с водой под давлением);
- б) отсутствие нештатных локальных всплесков мощности в твэлах;
- с) отсутствие ухудшения характеристик тепловыделяющей сборки по критическому тепловому потоку;
- д) отсутствие затруднений для движения регулирующих стержней при аварийном останове реактора или других их перемещениях;
- е) отсутствие затруднений при обращении с тепловыделяющими сборками.

3.68. Для предотвращения повреждения оболочки твэла, вызванного механическим взаимодействием таблеток с оболочкой твэла, которому может способствовать коррозионное растрескивание под напряжением, следует устанавливать соответствующие эксплуатационные пределы изменений мощности и скоростей ее скачкообразного изменения, исключающие превышение пороговых значений отказа при скачкообразном изменении мощности.

3.69. Тепловыделяющие сборки, другие внутрикорпусные устройства и системы теплоносителя реактора следует проектировать таким образом, чтобы минимизировать риск возникновения препятствий на пути потока теплоносителя вследствие попадания в систему незакрепленных предметов и обломков и предотвращать повреждение топлива в эксплуатационных состояниях.

3.70. Следует оценивать и соответствующим образом обосновывать пределы глубины выгорания ядерного топлива, зависящие от характеристик твэлов и тепловыделяющей сборки, а также от подхода к обращению с топливом.

*Проектные пределы для проектных аварий и запроектных условий без значительной деградации топлива*

3.71. В отношении проектных аварий и запроектных условий без значительной деградации топлива следует обеспечивать соблюдение перечисленных ниже условий:

- a) с целью минимизации радиологических последствий рассматриваемой аварии для тех последовательностей развития аварий, в которых технически невозможно избежать повреждения определенного количества твэлов, следует обеспечивать, чтобы количество поврежденных твэлов не превышало небольшой процентной доли от общего числа твэлов в активной зоне реактора;
- b) при определении общего числа повреждений твэлов следует проводить оценку всех известных возможных механизмов повреждения. К числу таких механизмов повреждения, которые следует учитывать, в частности, относятся химические реакции, включая окисление и наводороживание, раздутие оболочки твэла или ее разрыв, или повреждение оболочки твэла, вызванное ростом энтальпии топлива;
- c) следует обеспечивать, чтобы пределы, применяемые при оценке риска нарушения целостности оболочки твэла, основывались на результатах экспериментальных исследований. При определении пределов следует оценивать в полном объеме, используя консервативный подход, химические, физические, гидравлические и механические факторы, влияющие на механизмы повреждения, а также размерные допуски твэлов. Если механизмы повреждения топлива и пределы повреждения топлива зависят от выгорания, то при проведении экспериментов следует изучать влияние облучения на оболочку твэла и свойства топлива и включать эти данные в анализы для обеспечения полноты применения экспериментальных результатов;
- d) повреждение топлива считается произошедшим, если средняя радиальная энтальпия в любом месте по оси твэла, рассчитанная при помощи утвержденного инструментария, превышает определенное значение, которое должно быть определено на основе репрезентативных результатов экспериментальных исследований путем надлежащей корректировки условий испытаний таким образом, чтобы они представляли условия внутриреакторных исследований (к подлежащим учету параметрам испытаний относятся: температура теплоносителя, давление теплоносителя, расход теплоносителя, кинетика нарастания реактивности и давление внутри твэла). Поскольку механическая устойчивость оболочки твэла меняется при

воздействии облучения и может варьироваться в зависимости от типа оболочки твэла, предполагается, что пределы повреждения при аварии, вызванной ростом реактивности, зависят от выгорания топлива и материала оболочки твэла.

3.72. Следует обеспечивать сохранение способности охлаждения активной зоны в случае:

- a) чрезмерного раздутия или разрыва твэлов (например, при аварии с потерей теплоносителя);
- b) значительной деформации компонентов тепловыделяющих сборок или внутрикорпусных устройств реактора (например, при сейсмических событиях);
- c) блокирования потока или других последствий диспергирования топлива и взаимодействия топлива с теплоносителем в результате разрушения оболочки твэла (например, при авариях, вызванных ростом реактивности).

Кроме того, при проектировании твэлов следует предусматривать соответствующие меры предотвращения нежелательных последствий аварий, вызванных ростом реактивности, которые могут приводить к повреждению границы первого контура или повреждению, нарушающему способность охлаждать активную зону. Как правило, эта задача решается путем ограничения максимальной энтальпии топлива и допустимого увеличения энтальпии топлива.

3.73. Для обеспечения структурной целостности твэлов следует определять и обосновывать указанные ниже проектные пределы:

- a) следует обеспечивать, чтобы максимальная температура оболочки твэла в аварийных условиях не превышала уровень, при котором окисление оболочки твэла вызывает чрезмерное охрупчивание оболочки твэла или бесконтрольно ускоряется. Кроме того, для легководных реакторов следует надлежащим образом оценивать влияние фрагментации топлива и его аксиального перемещения внутри зоны раздутия твэла на максимальную температуру оболочки твэла. Следует также рассматривать возможные последствия диспергирования частиц топлива с точки зрения дозовых нагрузок персонала и возможности охлаждения активной зоны;
- b) следует обеспечивать, чтобы общее окисление оболочки твэла оставалось ниже пределов таким образом, чтобы оболочка твэла

сохраняла способность выдерживать нагрузки, возникающие в условиях аварий (например, на этапе повторного залива и быстрого охлаждения при аварии с потерей теплоносителя). Такие пределы следует определять путем экспериментов, в которых учитываются окисление и наводороживание оболочки твэла внутри реактора, имевшие место до начала переходного процесса и произошедшие во время переходного процесса (окисление внешней поверхности и, возможно, внутренней поверхности), а также химические взаимодействия между материалами топливных таблеток и оболочки твэла;

- с) допустимый рост энтальпии при авариях, вызванных ростом реактивности, следует ограничивать значениями, учитывающими исходные параметры твэлов (например, содержание водорода в оболочке твэла до начала переходного режима и выгорание топлива);
- d) в соответствующих случаях следует обеспечивать, чтобы зона расплавления топлива на осевой линии составляла незначительную часть объема топливной таблетки;
- e) твэлы следует проектировать таким образом, чтобы они выдерживали нагрузки, возникающие при обращении с тепловыделяющими сборками после окончания переходного режима, их хранении и транспортировке на установку по переработке или в пункт захоронения.

3.74. Для легководных реакторов следует обеспечивать, чтобы количество водорода, образующееся в результате химической реакции между теплоносителем и оболочкой твэла в результате аварии с потерей теплоносителя, не превышало незначительную долю (например, 1%) количества водорода, образующегося, если предположить, что все оболочки всех топливных таблеток в активной зоне реактора (кроме оболочки компенсационного объема) вступят в реакцию с теплоносителем.

3.75. В том случае, если невозможно предотвратить разрушение оболочки твэла во время аварии, вызванной ростом реактивности, следует обеспечивать, чтобы распространение частиц расплавленного топлива не нарушало способность охлаждать активную зону.

3.76. Следует неизменно обеспечивать ограничение структурных деформаций твэлов, тепловыделяющих сборок, регулирующих стержней и внутрикорпусных устройств реактора, с тем чтобы не допускать возникновения препятствий движению регулирующих стержней в реакторе. Кроме того, не следует допускать превышения в регулирующих стержнях температур плавления в любой момент времени или в любом месте.

## МЕХАНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И КОМПОНЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

### Соображения, касающиеся проектирования

3.77. Конструкции и компоненты активной зоны реактора следует проектировать с учетом необходимости поддержания их структурной целостности во всех применимых состояниях станции при воздействии различных механизмов повреждения, вследствие, например, вибрации (механической или вызванной потоком) и усталости; воздействия обломков; тепловых, гидравлических и механических нагрузок (например, при авариях с потерей теплоносителя и сейсмических событиях); и химических и радиационных воздействий (включая радиационное распухание). (Дополнительную информацию см. в приложении I).

3.78. Особое внимание следует уделять повреждению устройств управления реактивностью и останова реактора, а также повреждению границы первого контура реактора. Следует учитывать влияние высоких давлений, высоких температур, температурных колебаний и распределения температуры, коррозии, интенсивности поглощения излучения и доз облучения за все время срока службы на физические размеры, механические нагрузки и свойства материалов.

3.79. Кроме того, при проектировании механических устройств управления реактивностью следует предусматривать их способность выдерживать нагрузки, возникающие при операциях перегрузки, транспортировки и хранения топлива.

3.80. Важные аспекты, которые, как правило, рассматриваются при проектировании устройств управления реактивностью, нейтронных источников и гидравлических заглушек, изложены в приложении II.

3.81. При проектировании опорных конструкций активной зоны следует предусматривать надлежащие запасы безопасности при температурных нагрузках во всех применимых состояниях станции и учитывать дополнительные воздействия на их охлаждение и термическое реагирование, вызванные их нагреванием при поглощении гамма-излучения. Следует также рассматривать различные виды химического воздействия теплоносителя и замедлителя на эти конструкции, включая коррозию, наводороживание, коррозионное растрескивание под напряжением и отложение продуктов коррозии.

3.82. При проектировании тепловыделяющих сборок, регулирующих стержней и направляющих конструкций, а также опорных конструкций тепловыделяющих сборок следует предусматривать возможность проведения инспекций компонентов активной зоны и связанных с ними конструкций.

3.83. В легководных реакторах к опорным конструкциям активной зоны относятся трубные доски, обечайка активной зоны и опорные фиксаторы, поддерживающие опорные конструкции тепловыделяющих сборок в требуемом геометрическом положении внутри шахты реактора. Данные опорные конструкции активной зоны и опорные конструкции тепловыделяющих сборок следует проектировать таким образом, чтобы они выдерживали статические и динамические нагрузки, в том числе возникающие при обращении с топливом и его перегрузке.

3.84. Конструкции и направляющие трубы для устройств останова и управления реактивностью, а также для контрольно-измерительной аппаратуры следует проектировать таким образом, чтобы исключить возможность перемещения этих устройств во всех применимых состояниях станции вследствие непреднамеренных действий оператора, воздействия на оборудование нагрузок, гидравлических усилий, вызванных потоком теплоносителя, или перемещений основного объема замедлителя. В проекте следует предусматривать меры, облегчающие замену этих устройств и аппаратуры. При проектировании следует учитывать, что в условиях долгосрочной эксплуатации воздействие вызванной потоком вибрации на эти устройства, приборы или их направляющие трубы может приводить к их фреттингу, износу и последующему отказу. Кроме того, при проектировании следует учитывать необходимость обеспечения стабильности геометрических размеров направляющих конструкций в течение всего срока их эксплуатации.

3.85. Если устройства останова и управления реактивностью погружены в объем замедлителя (например, в тяжеловодных реакторах с водой под давлением), при проектировании следует учитывать воздействие на эти конструкции гидравлических сил.

3.86. В проекте следует предусматривать меры, облегчающие замену устройств управления реактивностью и останова без повреждения других компонентов активной зоны реактора, неприемлемого повышения реактивности или чрезмерного облучения персонала.

3.87. В зависимости от типа реактора внутри корпуса реактора могут находиться различные другие конструкции. В частности, к ним относятся распылители питательной воды, сепараторы пара, пароосушители, выгородки активной зоны, отражатели и тепловые экраны. В функции этих внутрикорпусных устройств входит распределение потока теплоносителя, сепарация или осушение пара и защита корпуса реактора от эффектов, связанных с воздействиями нагрева гамма-излучением и нейтронного потока. Эти конструкции следует проектировать в соответствии с положениями пунктов 3.77–3.81, с тем чтобы их механическое поведение не препятствовало выполнению функций безопасности активной зоны реактора в течение всего срока их эксплуатации.

### **Проектные пределы при механическом проектировании конструкций и компонентов активной зоны**

3.88. При проектировании конструкций и компонентов активной зоны следует соблюдать пределы, сформулированные в применимых сводах положений и нормах, выбранных в соответствии с классификацией по безопасности (см. пункты 2.15–2.17).

## **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ОСТАНОВА И МОНИТОРИНГА АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА**

### **Система управления активной зоной реактора**

3.89. В данном разделе изложены важные касающиеся системы управления соображения в отношении поддержания в установленных пределах во всех применимых состояниях станции форм, уровней и стабильности нейтронного потока, с тем чтобы соблюдать требование 45 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1].

3.90. Пункт 6.4 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] гласит: «Должны предусматриваться адекватные средства для определения распределений нейтронного потока в активной зоне реактора и их изменений с целью обеспечить отсутствие в активной зоне областей, в которых могут быть превышены проектные пределы».

3.91. В целях обеспечения возможности реализации необходимых корректирующих мер следует обеспечивать, чтобы проект активной зоны предусматривал возможность монтажа требуемой

контрольно-измерительной аппаратуры и датчиков для мониторинга параметров активной зоны, таких как мощность (уровень, распределение и динамика изменения), условия и физические свойства теплоносителя и замедлителя (расход и температура) и ожидаемая эффективность средств останова реактора (например, скорость введения поглощающих устройств в сравнении с установленными для них пределами). Следует обеспечивать, чтобы контрольно-измерительные приборы и аппаратура контролировали соответствующие параметры во всех диапазонах их ожидаемых значений во всех применимых состояниях станции, в том числе при перегрузке топлива.

### *Устройства управления реактивностью*

3.92. Средства управления реактивностью следует проектировать с учетом необходимости обеспечения возможности поддержания уровня мощности и распределения энерговыделения в пределах безопасной эксплуатации. Это подразумевает компенсацию изменений реактивности с целью поддержания технологических параметров в установленных эксплуатационных пределах, например, связанных с:

- a) штатным маневрированием мощностью;
- b) изменениями концентрации ксенона;
- c) эффектами, связанными с температурными коэффициентами;
- d) расходом теплоносителя или изменениями температуры и плотности теплоносителя (или замедлителя);
- e) обеднением топлива и выгорающего поглотителя;
- f) совокупным поглощением нейтронов продуктами деления.

3.93. Следует предусматривать, чтобы устройства управления реактивностью обеспечивали поддержание реактора в подкритическом состоянии с учетом проектных аварий и их последствий. При проектировании следует предусматривать меры для обеспечения поддержания подкритичности в таких состояниях станции, в которых временно заблокированы средства штатного останова, охлаждения топлива или обеспечения целостности системы охлаждения первого контура (например, когда корпус реактора вскрыт для проведения технического обслуживания и ремонта или перегрузки топлива на легководных реакторах).

3.94. Описание типов устройств управления реактивностью, используемых для управления реактивностью активной зоны и распределения энерговыделения в различных проектах ядерных реакторов, содержится в приложении I.

3.95. Следует обеспечивать, чтобы в условиях нормальной эксплуатации использование регулирующих стержней в качестве средств управления реактивностью не оказывало значительного влияния на их работоспособность и эффективность, необходимые для быстрого останова реактора.

3.96. Максимальную степень положительной реактивности и скорость ее ввода во всех применимых состояниях станции требуется ограничивать или компенсировать таким образом, чтобы предотвращать любое результирующее повреждение границы давления первого контура реактора, сохранять охлаждающую способность и предотвращать любое значительное повреждение активной зоны реактора (см. пункт 6.6 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1]).

3.97. При проектировании следует предусматривать такие компоновку, группирование, скорость и последовательность извлечения средств управления реактивностью, используемых совместно с системой блокировки, при которых никакое нештатное извлечение этих устройств не сможет привести к превышению проектных пределов по ядерному топливу. Такое нештатное извлечение средств управления реактивностью следует рассматривать при оценке безопасности.

3.98. Системы управления реактивностью, использующие растворимые поглотители, следует проектировать таким образом, чтобы предотвращалась возможность любого непреднамеренного снижения концентрации поглотителя в активной зоне до значений, при которых возможно превышение проектных пределов по ядерному топливу. При проектировании частей систем, содержащих такие растворимые поглотители, как борная кислота, следует исключать осаждение поглотителя (например, вследствие разогрева компонентов, см. публикацию Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-56, «Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants» («Проектирование системы теплоносителя реактора и связанных систем на атомных электростанциях») [13]). Следует осуществлять мониторинг концентрации растворимого поглотителя во всех баках хранения. При использовании обогащенного бора ( $^{10}\text{B}$ ) следует обеспечивать надлежащий мониторинг.

3.99. Следует выполнить подробный функциональный анализ настроек и условий эксплуатации систем управления с целью определения любой потенциальной возможности непреднамеренного разбавления бора в режимах эксплуатации и останова и предусмотреть надлежащие меры

предупредительного и восстановительного характера. К числу таких предупредительных мер могут относиться постоянная административная блокировка (клапанов или частей контура), меры по активному отключению, блокировка внешних систем впрыска, мониторинг концентраций бора в соединенных между собой емкостях или системах трубопроводов и блокировка включения циркуляционных насосов.

3.100. Эффективность устройств управления реактивностью, таких как стержни поглотителей нейтронов, следует подтверждать путем непосредственных измерений.

3.101. Пункт 6.5 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] гласит: «При проектировании устройств управления реактивностью должны надлежащим образом учитываться износ и эффекты облучения, такие как выгорание, изменения физических свойств и газообразование».

3.102. В частности, при проектировании систем управления следует учитывать перечисленные ниже эффекты, связанные с воздействиями среды:

- a) эффекты облучения, такие как обеднение материала поглотителя или распухание и нагревание материалов вследствие поглощения нейтронного и гамма-излучения. Следует соответственно производить замену или перестановку регулирующих стержней;
- b) химические эффекты, такие как коррозия устройств управления реактивностью. Кроме того, следует также учитывать перемещение активированных продуктов коррозии по системе теплоносителя и системе замедлителя реактора;
- c) следует обеспечивать, чтобы изменения геометрических параметров конструкций, такие как изменения размеров или перемещение внутренних конструкций активной зоны вследствие изменений температуры, воздействия облучения или внешних событий, в частности землетрясений, не препятствовали вводу устройств управления реактивностью.

### **Система останова реактора**

3.103. В данном разделе изложены важные соображения в отношении систем, предназначенных для перевода реактора в подкритическое состояние во всех применимых состояниях станции и поддержания его в этом состоянии в соответствии с требованием 46 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1].

Требование 61 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] в отношении системы защиты также применимо к системе останова реактора.

3.104. Следует предусматривать, чтобы система останова реактора обеспечивала, что во всех применимых состояниях станции не превышаются проектные пределы для запаса подкритичности (пункты 3.24 и 3.25). Необходимую надежность следует обеспечивать путем соответствующего проектирования оборудования. В частности, при проектировании следует обеспечивать необходимую независимость технологических процессов на станции и систем управления и защиты.

3.105. Пункт 6.7 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] гласит: «Эффективность, быстродействие и запас по реактивности средств останова реактора должны быть такими, чтобы не превышались установленные проектные пределы для топлива». Рекомендации по скорости срабатывания систем останова содержатся в пунктах 3.106–3.107.

3.106. Следует обеспечивать скорость срабатывания системы останова, достаточную для перевода реактора в подкритическое состояние без нарушения проектных пределов, установленных для ядерного топлива и систем первого контура реактора.

3.107. При проектировании или оценке скорости останова следует учитывать перечисленные ниже факторы:

- a) время срабатывания контрольно-измерительных приборов для запуска процесса останова;
- b) время срабатывания исполнительных механизмов системы останова;
- c) расположение устройств останова (в зависимости от выбранного проекта активной зоны реактора);
- d) легкость введения устройств останова в активную зону. Ее можно обеспечивать путем использования направляющих труб или других конструктивных решений, облегчающих введение устройств, включая возможное использование гибких соединительных муфт для уменьшения продольной жесткости устройств;
- e) скорость ввода устройств останова. Требуемой скорости ввода можно добиться одним или несколькими следующими способами:
  - i) падением устройства останова в активную зону под действием силы тяжести;

- ii) использованием гидравлических или пневматических приводов высокого давления для ввода стержней останова в активную зону;
- iii) инъекцией растворимого поглотителя нейтронов с помощью гидравлических или пневматических систем.

3.108. Следует предусматривать средства проверки скорости ввода устройств останова. Скорость ввода следует проверять на периодической основе (как правило, в начале каждой топливной кампании) и, возможно, во время топливной кампании, если запасы до пределов недостаточны.

3.109. Пункт 6.8 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] гласит:

«При анализе адекватности средств останова реактора внимание должно быть уделено отказам, возникающим в любом месте станции, в результате которых часть средств останова может быть выведена из строя (например, из-за отказа устройства ввода стержня управления) или произойти отказ по общей причине».

Как правило, при оценке отказа при вводе регулирующего стержня следует предполагать возникновение в активной зоне максимальной реактивности, вызванной невозможностью ввода в активную зону устройства останова с наибольшей эффективностью (т.е. делается предположение о том, что одно устройство останова заклинило).

#### *Различные средства останова*

3.110. Пункт 6.9 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] гласит: «Средства останова реактора должны состоять по меньшей мере из двух неодинаковых и независимых систем». Кроме того, пункт 6.10 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] гласит: «Как минимум одна из этих двух различных систем останова должна быть способна самостоятельно, с соответствующим запасом и высокой надежностью удерживать реактор в подкритическом состоянии даже в условиях наибольшей реактивности активной зоны реактора».

3.111. В таблице 1 приведены типовые примеры, иллюстрирующие разнообразие средств останова, используемых на трех различных типах реакторов (кипящие реакторы, реакторы с водой под давлением и тяжеловодные реакторы с водой под давлением).

ТАБЛИЦА 1. СРЕДСТВА ОСТАНОВА РЕАКТОРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Тип реактора	Система быстрого останова	Альтернативная система останова
Кипящий реактор	B <sub>4</sub> C в стальных трубах или гафниевые пластины (или гибридная схема)	Раствор бора, впрыскиваемый в замедлитель/теплоноситель
Реактор с водой под давлением	Ag–In–Cd в стальных трубах или B <sub>4</sub> C в стальных трубах, гафниевые стержни	Раствор бора, впрыскиваемый в замедлитель/теплоноситель
Тяжеловодный реактор с водой под давлением	Кадмиевые стержни, зажатые и герметически изолированные между трубами из нержавеющей стали, перемещающимися в направляющих трубах из циркониевого сплава	Раствор гадолиния, впрыскиваемый в замедлитель низкого давления*

\* Данная система останова может действовать так же, как еще одна быстродействующая система останова.

### Надежность

3.112. В проект следует включать перечисленные ниже меры, которые обеспечивают надежность останова как в совокупности, так и по отдельности, в зависимости от обстоятельств:

- a) применение систем несложной конструкции, простых в эксплуатации и срабатывающих автоматически;
- b) выбор оборудования апробированной конструкции;
- c) использование, насколько это практически возможно, отказоустойчивых конструкций (дополнительную информацию см. в приложении I);
- d) учет возможных режимов отказов и применение резервирования при запуске систем останова (например, датчиков). Обеспечение разнообразия возможно, например, путем использования для каждого аварийного условия, насколько это практически возможно, двух

- различных и независимых физических параметров, обеспечивающих срабатывание системы останова;
- e) функциональная изоляция и физическое разделение систем останова (включая разделение функций управления и останова), насколько это практически возможно, при формировании допущений в отношении вероятных режимов отказов, включая отказ по общей причине;
  - f) обеспечение легкого введения средств останова в активную зону с учетом состояния среды внутри активной зоны в условиях эксплуатации и при аварийных условиях в пределах проектных основ;
  - g) проектирование с целью облегчения технического обслуживания, инспекций в процессе эксплуатации и эксплуатационных испытаний;
  - h) обеспечение средств для проведения комплексных испытаний при вводе в эксплуатацию и во время остановов для проведения периодической перегрузки топлива или технического обслуживания;
  - i) испытания приводного механизма (или, если это возможно, частичный ввод стержня) в процессе эксплуатации;
  - j) проектирование для работы в экстремальных условиях (например, землетрясений).

3.113. При проектировании систем останова, как указано в пункте 6.5 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1], требуется надлежащим образом учитывать износ оболочек регулирующих стержней и эффекты облучения, такие как выгорание, изменения физических свойств и образование газообразного гелия. Рекомендации, содержащиеся в пункте 3.102, применимы и в отношении проектирования систем останова. Конкретные рекомендации в отношении альтернативных систем останова, впрыскивающих поглотители нейтронов в систему теплоносителя реактора, содержатся в публикации SSG-56 [13].

#### *Эффективность системы останова*

3.114. Пункт 6.11 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1] гласит:

«Средства останова должны быть в состоянии предотвратить любое прогнозируемое повышение реактивности, приводящее к непреднамеренному возникновению критичности в ходе операций по останову или перегрузке топлива или иных стандартных или нестандартных операций в состоянии останова».

С целью обеспечения учета наиболее реактивных условий при анализе критичности следует выявлять и оценивать требования к длительному

останову и намеренным действиям, приводящим к повышению реактивности в состоянии останова (например, действиям по перемещению поглотителей в целях технического обслуживания, уменьшению содержания бора и перегрузке топлива).

3.115. При проектировании следует путем учета различных факторов определять количество и эффективность стержней останова. К числу важных факторов, которые необходимо учитывать, относятся:

- a) размер активной зоны;
- b) тип топлива и схема загрузки активной зоны;
- c) требуемый запас подкритичности;
- d) допущения, сделанные в отношении отказа устройства или устройств останова;
- e) погрешности, связанные с расчетами;
- f) эффект экранирования устройств останова (дополнительную информацию см. в приложении I);
- g) условия наибольшей реактивности активной зоны после останова. Они зависят от ряда таких параметров, как:
  - i) конфигурация активной зоны, обладающая наибольшей реактивностью (и в надлежащих случаях соответствующая концентрация бора), которая возникнет в течение всей кампании, включая перегрузку топлива;
  - ii) возможное сочетание температур топлива и замедлителя, приводящее к наибольшей реактивности;
  - iii) количество введенной положительной реактивности, приводящее к возникновению условий проектной аварии;
  - iv) изменение содержания ксенона со временем после останова;
  - v) выгорание поглотителя.

3.116. Следует демонстрировать эффективность системы останова:

- a) при проектировании, с помощью расчетов;
- b) при вводе в эксплуатацию и перед пуском непосредственно после каждой перегрузки топлива, путем проведения соответствующих нейтронно-физических и технологических измерений с целью подтверждения расчетов для рассматриваемой топливной загрузки активной зоны;
- c) во время эксплуатации реактора путем проведения измерений и расчетов, учитывающих существующие и ожидаемые условия в активной зоне реактора.

В этих анализах следует рассматривать состояния наибольшей реактивности активной зоны и учитывать допущение об отказе устройств(а) останова. Кроме того, следует поддерживать необходимый запас подкритичности на случай возникновения в системе останова случайного единичного отказа.

3.117. Если эксплуатация системы останова реактора осуществляется в режиме ручного управления или в полуавтоматическом режиме, следует обеспечивать выполнение требуемых предварительных условий в отношении ручного управления (см. публикацию Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-39, «Проектирование систем контроля и управления для атомных электростанций» [14]).

3.118. В режиме нормальной эксплуатации часть средств останова может использоваться для целей управления реактивностью и формирования нейтронного потока. Следует обеспечивать, чтобы подобное использование не ставило под угрозу функционирование системы останова во всех применимых состояниях станции.

3.119. Для обеспечения уверенности в готовности системы останова к срабатыванию, когда это необходимо, следует, насколько это практически осуществимо, предусматривать возможность проведения ее испытаний в процессе эксплуатации.

#### *Разделение систем защиты и систем управления*

3.120. Как указано в требовании 64 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1], для того чтобы отказы систем управления не приводили к отказам систем защиты, необходимо физическое и функциональное разделение систем защиты и систем управления. Руководящие материалы по разделению системы защиты и других систем содержатся в публикации SSG-39 [14].

#### **Система частичного быстрого останова**

3.121. В некоторые проектах реакторных установок для защиты реактора при превышении определенными параметрами (например, температурой, давлением, уровнями, расходом теплоносителя и мощностью нейтронного потока) установленных проектных пределов станции предусмотрено срабатывание системы частичного быстрого останова. В соответствующих случаях при проектировании следует обеспечивать, чтобы частичный быстрый останов, вызванный любым переходным процессом ожидаемого

при эксплуатации события, не приводил к превышению установленных проектных пределов по ядерному топливу.

## **Эксплуатационные пределы и уставки**

### *Эксплуатационные пределы системы управления*

3.122. При проектировании следует предусматривать эксплуатационные пределы и связанные с ними уставки для выполнения действий, срабатывания систем сигнализации или быстрого останова реактора с целью обеспечения того, чтобы распределения энерговыделения в процессе эксплуатации оставались в рамках проектных значений распределений энерговыделения.

3.123. При определении значений пределов и уставок следует учитывать влияние выгорания топлива, эффектов экранирования и стратификации теплоносителя (распределения температуры в теплоносителе).

3.124. При определении эксплуатационных пределов и уставок следует учитывать влияние старения системы первого контура реактора (например, забивание труб парогенератора в реакторах с водой под давлением и увеличение диаметра топливных каналов в тяжеловодных реакторах с водой под давлением).

### *Уставки защиты активной зоны реактора*

3.125. Для управления реактором и обеспечения возможности останова реактора в любой момент времени в процессе эксплуатации следует устанавливать и использовать уставки. Следует обеспечивать, чтобы срабатывание системы управления и защиты при работе реактора в переходных режимах предотвращало повреждение топлива, а на ранних стадиях развития аварий минимизировало степень повреждения топлива.

3.126. Для предотвращения избыточной эффективности регулирующих стержней или чрезмерных скоростей ввода реактивности следует определять требования к характеристикам оборудования, эксплуатационные пределы и процедуры. Их возможности следует продемонстрировать. Там, где это технически возможно, необходимо использовать сигнализацию, срабатывающую при нарушении или при приближающемся нарушении таких пределов или ограничений.

3.127. Проектные пределы, неопределенности, эксплуатационные пределы, требования к контрольно-измерительной аппаратуре и уставки следует фиксировать в технических спецификациях для использования операторами установки.

### **Система мониторинга активной зоны**

3.128. В соответствии с требованием 59 публикации SSR-2/1 (Rev. 1) [1], для обеспечения работы систем управления и защиты реактора, а также для предоставления достаточно подробной и своевременной информации об условиях локального тепловыделения, преобладающих в активной зоне, требуется, чтобы была предусмотрена контрольно-измерительная аппаратура. Для того чтобы иметь возможность производить любую требуемую модификацию параметров активной зоны (например, глубину ввода регулирующих стержней, плотность нейтронного потока, температуру и давление теплоносителя) в установленных эксплуатационных пределах, в проекте активной зоны следует предусматривать датчики и устройства для мониторинга величины и изменений мощности активной зоны, а также локального распределения тепловыделения в активной зоне. Определяющим фактором при выборе автоматического или ручного режима работы систем управления реактором является скорость изменения параметра.

3.129. Кроме того, следует обеспечивать мониторинг уровней активности радионуклидов в теплоносителе с целью оценки целостности топливной системы во время эксплуатации и подтверждения того, что не превышены проектные или эксплуатационные пределы.

3.130. Для мониторинга активной зоны следует выбирать соответствующие параметры. Этот выбор зависит от типа реактора. Ниже приведены примеры параметров, измеряемых в целях мониторинга активной зоны:

- a) пространственное распределение нейтронного потока и соответствующие коэффициенты неравномерности распределения энерговыведения;
- b) давление в первом контуре реактора;
- c) температура теплоносителя (например, температура на входе и температура на выходе активной зоны);
- d) скорость вращения главного циркуляционного насоса;
- e) уровень воды (в легководных реакторах);

- f) активность радионуклидов в теплоносителе (дополнительную информацию см. в приложении I);
- g) глубина ввода регулирующих стержней;
- h) концентрация растворимого бора или содержание  $^{10}\text{B}$  при использовании обогащенного бора (в реакторах с водой под давлением).

3.131. Другие параметры, связанные с безопасностью, можно рассчитать на основе измеренных параметров. В частности, к таким связанным с безопасностью параметрам относятся:

- a) время удвоения нейтронного потока;
- b) скорость изменения нейтронного потока;
- c) осевая и радиальная несбалансированность нейтронного потока;
- d) баланс реактивности;
- e) теплогидравлические параметры активной зоны (например, тепловая мощность активной зоны, линейная мощность, расход теплоносителя, коэффициент запаса до кризиса кипения или коэффициент критической мощности).

3.132. Следует обеспечивать, чтобы точность, скорость срабатывания, диапазон действия и надежность всех систем мониторинга были достаточными для выполнения ими проектных функций (см. публикацию SSG-39 [14]). При проектировании следует предусматривать возможность непрерывного или надлежащего периодического тестирования этих систем.

3.133. Руководящие материалы в отношении послеаварийного мониторинга приведены в публикации SSG-39 [14]. Если необходимо обеспечить мониторинг активной зоны в условиях аварии, например, для контроля температуры системы, уровня воды в корпусе реактора или значений реактивности, то используемую контрольно-измерительную аппаратуру следует аттестовать для работы в условиях окружающей среды, ожидаемых во время аварии и после нее.

3.134. Мониторинг пространственного распределения энерговыделения следует проводить с помощью контрольно-измерительной аппаратуры, находящейся как вне активной зоны, так и внутри нее (такой как нейтронные датчики и гамма-термометры). Для обеспечения поддержания надлежащих запасов безопасности с учетом влияния изменений пространственного распределения энерговыделения, обусловленных эффектами, связанными

с управлением активной зоной, и эффектами выгорания в активной зоне, следует проводить измерения локальной мощности в различных точках активной зоны. Следует регулярно проводить мониторинг энерговыделения в активной зоне. Датчики следует надлежащим образом распределять по активной зоне, с тем чтобы надежно регистрировать локальные изменения плотности энерговыделения. Следует проводить периодическую калибровку датчиков нейтронов, расположенных как внутри активной зоны, так и вне ее.

3.135. Для того чтобы обеспечивать, что состояние активной зоны находится в рамках эксплуатационных пределов, установленных при анализе безопасности, следует использовать компьютеризованную систему мониторинга активной зоны. Поскольку эта система сопряжена с системой защиты, следует обеспечивать ее аттестацию в соответствии с категорией безопасности выполняемых ею функций (см. публикацию SSG-39 [14]).

3.136. Во время останова реактора следует обеспечивать наличие минимального комплекса приборов или сочетания приборов и нейтронных источников для мониторинга нейтронного потока и распределения энерговыделения (например, путем использования датчиков нейтронного потока надлежащей чувствительности) в ситуациях, когда в корпусе реактора находятся тепловыделяющие сборки, в том числе на этапах загрузки топлива и пуска реактора.

3.137. В некоторых реакторах на этапе пуска реактора используется сочетание блокировок систем мониторинга нейтронного потока и устройств управления реактивностью для того, чтобы обеспечить применение наиболее подходящих средств мониторинга для конкретных диапазонов плотности нейтронного потока и избежать неоправданных аварийных остановов реактора. Следует обеспечивать совместимость проектов таких систем блокировок с проектом системы защиты реактора.

3.138. Нейтронный поток во время пуска реактора, и особенно во время первого пуска, весьма мал по сравнению с нейтронным потоком при эксплуатации на полной мощности, и поэтому для его мониторинга могут временно потребоваться более чувствительные нейтронные датчики. При пуске может потребоваться источник нейтронов для повышения интенсивности потока до уровня в пределах диапазона чувствительности

мониторов нейтронного потока при пуске. При проектировании таких нейтронных источников следует обеспечивать:

- a) надлежащее функционирование источников с целью получения сигналов достаточной интенсивности от мониторов нейтронного потока в течение всего запланированного срока их службы;
- b) совместимость таких источников с тепловыделяющими сборками и их опорными конструкциями.

## УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ

### Соображения, касающиеся проектирования

3.139. Главная цель управления активной зоной заключается в том, чтобы обеспечивать безопасное, надежное и оптимальное использование топлива в реакторе без нарушения эксплуатационных пределов и условий.

3.140. В целях соблюдения проектных пределов по ядерному топливу каждую кампанию следует проектировать, предусматривая надлежащие средства управления реактивностью в активной зоне и распределением энерговыделения в ней.

3.141. Хотя особенности управления активной зоной зависят от типа реактора, во всех случаях следует обеспечивать, чтобы в программе управления активной зоной были предусмотрены:

- a) средства для эффективного выполнения функций управления активной зоной в течение всей кампании в целях сохранения параметров активной зоны в проектных пределах. Функции управления активной зоной включают: проектирование активной зоны (схем загрузки и перемещения тепловыделяющих сборок для обеспечения оптимального выгорания топлива и необходимой интенсивности нейтронного потока), приобретение тепловыделяющих сборок, определение реактивности и мониторинг параметров активной зоны в процессе эксплуатации;
- b) стратегии эксплуатации активной зоны, допускающие максимальную эксплуатационную гибкость и оптимальное использование топлива без нарушения проектных пределов управления активной зоной.

## *Проектирование активной зоны*

3.142. Для достижения требуемых значений реактивности и распределения энерговыделения в активной зоне при эксплуатации реактора эксплуатирующей организации следует предоставлять указанную ниже информацию:

- a) картограммы топливных загрузок (включая обогащение и конфигурацию твэлов) и ориентацию тепловыделяющих сборок в каждой кампании (для легководных реакторов);
- b) график предстоящих выгрузок и загрузок тепловыделяющих сборок;
- c) конфигурации устройств управления реактивностью и останова;
- d) данные о выгорающих поглотителях и других компонентах активной зоны, подлежащих выгрузке, загрузке или корректировке параметров.

3.143. Параметры, связанные с обеднением топлива и выгорающего поглотителя, а также другие физические параметры реактора предоставляются в качестве исходных данных для анализа безопасности, систем мониторинга и защиты станции, а также подготовки руководящих материалов для операторов. Поэтому такие параметры следует анализировать, исходя из заранее заданных целей эксплуатации станции и разработанных на их основе планов. К этим физическим параметрам реактора относятся условия пуска реактора (например, критическая концентрация бора и положения регулирующих стержней, кинетика реактора, температурные коэффициенты реактивности топлива, температурные коэффициенты реактивности замедлителя, эффективность регулирующих стержней и групп регулирующих стержней и коэффициенты неравномерности энерговыделения).

3.144. Незапланированное маневрирование мощностью в режиме переменной нагрузки может приводить к изменению профилей энерговыделения и выгорания в активной зоне. Поэтому прогнозные значения параметров, связанных с обеднением топлива и выгорающего поглотителя, а также другие ядерные параметры следует постоянно или периодически оценивать и анализировать, используя соответствующие параметры мониторинга.

3.145. В проектирование активной зоны следует включать анализ, демонстрирующий, что стратегия обращения с топливом и установленные эксплуатационные ограничения обеспечивают соблюдение проектных

пределов по нейтронно-физическому расчету и, следовательно, проектных пределов по ядерному топливу на протяжении всей кампании.

3.146. В целях обеспечения реалистичности анализа активной зоны реактора во всех применимых состояниях станции предпочтительно использовать многомерные и многоуровневые физические коды и системные теплогидравлические коды. При анализе следует должным образом учитывать неопределенности (более подробную информацию см. в публикации SSG-2 (Rev. 1) [6]).

3.147. Анализ поведения активной зоны реактора следует выполнять на основе типовых случаев, охватывающих всю кампанию, для следующих условий в активной зоне реактора:

- a) работа на полной мощности, включая репрезентативные распределения энерговыделения;
- b) следящее за нагрузкой маневрирование (если применимо);
- c) выход на критичность и работа на мощности;
- d) маневрирование мощностью;
- e) пуск;
- f) перегрузка топлива;
- g) останов;
- h) ожидаемые при эксплуатации события;
- i) эксплуатация на границе теплогидравлической стабильности (для кипящих реакторов).

При изменении процедур обращения с топливом в активной зоне или любых характеристик твэлов (таких как обогащение топлива, размеры твэлов, их конфигурация или материал оболочки твэла) следует провести новый анализ активной зоны и задокументировать его результаты.

3.148. В анализ активной зоны реактора следует включать анализ поведения твэлов, основанный на среднем и локальном уровнях мощности, а также на аксиальных распределениях температуры, с тем чтобы продемонстрировать соблюдение соответствующих температурных и механических проектных пределов по ядерному топливу во всех эксплуатационных состояниях. Для легководных реакторов в анализ активной зоны реактора следует включать анализ пиковой мощности канала и пикового линейного энерговыделения в условиях нормальной эксплуатации на максимальной мощности и стационарного радиального энергораспределения в месте нахождения каждой тепловыделяющей сборки, а также осевых

энергораспределений в каждой тепловыделяющей сборке. Следует ввести поправку на влияние изменений геометрии тепловыделяющей сборки на ее нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики (например, изменения ширины водяного зазора между ТВС или между твэлами вследствие прогиба сборки). В анализ активной зоны следует также включать расчеты радиального распределения мощности и искажения аксиального распределения за счет дистанционирующих решеток и других компонентов для идентификации «горячих пятен» и оценки локальных уровней мощности.

### *Перегрузка топлива*

3.149. Для перегрузки на мощности в реакторах с тяжелой водой под давлением следует продемонстрировать, что влияние перегрузки топлива на нейтронно-физические характеристики активной зоны контролируется системами управления реактора.

3.150. При анализе безопасности следует учитывать все события, которые могут вызывать нежелательную критичность на этапах загрузки или перегрузки топлива и обращения с топливом.

3.151. Следует проводить мониторинг последовательности загрузки топлива с помощью внутриреакторных (для реакторов с кипящей водой) или размещенных вне активной зоны датчиков распределения нейтронного потока или с помощью специальных административных мер. Картограмму топливной загрузки после перегрузки топлива следует валидировать путем измерений распределения нейтронного потока.

3.152. Активную зону легководных реакторов следует проектировать таким образом, чтобы последствия наихудшей неправильной загрузки тепловыделяющей сборки, если таковые имеются, не приводили к несоблюдению проектных пределов по нейтронно-физическому расчету и проектных пределов по ядерному топливу. Если предполагается, что появление такой неправильно загруженной тепловыделяющей сборки может быть предотвращено путем использования специального оборудования и реализации специальных мер, следует продемонстрировать эффективность и надежность этих предупредительных мер. При невозможности демонстрации достаточности указанных предупредительных мер следует произвести расчетные анализы.

## **Проектные пределы управления активной зоной**

3.153. При анализе активной зоны реактора следует подтверждать, что картограмма топливной загрузки будет обеспечивать соблюдение проектных пределов по ядерному топливу во всех применимых состояниях станции.

3.154. Исходя из соображений практичности и простоты, в легководных реакторах система, обеспечивающая расчет и мониторинг ключевых параметров безопасности реактора (см. пункт 3.130), может использоваться для верификации пригодности проектирования перегрузок активной зоны.

## **Специальные конфигурации активной зоны**

### *Смешанная активная зона*

3.155. В случае загрузки в активную зону тепловыделяющих сборок различного типа («смешанная активная зона») следует обеспечивать, чтобы во всех применимых состояниях станции для всех типов тепловыделяющих сборок соблюдались проектные пределы по ядерному топливу. Следует производить оценку первоначальной загрузки и последующих перегрузок топлива в смешанных активных зонах. В нее следует включать размерное, механическое и теплогидравлическое поведение различных типов топлива (например, в терминах характеристик перепада давления на тепловыделяющей сборке или сборках и расхода теплоносителя), совместимость каждой тепловыделяющей сборки с исходными нейтронно-физическими и теплогидравлическими характеристиками активной зоны и с результатами соответствующего анализа безопасности. Следует обеспечивать, чтобы корреляция критического теплового потока или критической мощности, используемая в системе мониторинга активной зоны, была применима для всех типов тепловыделяющих сборок, загруженных в смешанную активную зону.

3.156. В случае тепловыделяющих сборок различных конструкций следует оценивать соответствующие ключевые параметры ядерной безопасности, такие как реактивность, коэффициенты реактивности, распределения мощности и эффективность регулирующих стержней. Оценку совместимости тепловыделяющих сборок можно выполнять на основе расчетов для однотипных тепловыделяющих сборок с применением соответствующих мер, позволяющих использовать их для

всех тепловыделяющих сборок. Следует оценивать совокупное влияние на соответствующие параметры в масштабах всей активной зоны.

*Активная зона со смешанным оксидным топливом*

3.157. В проектирование активной зоны со смешанным оксидным топливом следует включать анализ с целью обеспечения того, чтобы при всех применимых состояниях станции соблюдались проектные пределы по нейтронно-физическому расчету (как для первоначальной загрузки, так и для последующих перегрузок топлива) и проектные пределы по ядерному топливу. Следует обеспечивать, чтобы в этом анализе были учтены перечисленные ниже аспекты:

- a) свойства смешанного оксидного топлива (дополнительную информацию см. в приложении I) несколько отличаются от свойств топлива на основе  $UO_2$ , и этот факт следует учитывать при использовании компьютерных кодов и моделей для проектирования топлива и анализа безопасности;
- b) в активной зоне со смешанным оксидным топливом эффективность регулирующего стержня и эффективность поглотителя уменьшаются в результате повышения жесткости спектра нейтронов вследствие более высоких значений сечений реакций поглощения тепловых нейтронов плутонием по сравнению с ураном, и, как следствие, возникает возможность снижения запаса подкритичности. Для того чтобы компенсировать уменьшенный запас подкритичности, следует предусматривать возможность ввода дополнительных регулирующих стержней или использование дополнительной поглощающей способности материалов поглотителя (например, увеличение обогащения по  $^{10}B$ );
- c) значения кинетических параметров смешанного оксидного топлива, а именно суммарная доля запаздывающих нейтронов и время жизни мгновенных нейтронов, несколько ниже аналогичных значений для топлива на основе  $UO_2$ . Более низкая доля запаздывающих нейтронов смешанного оксидного топлива может приводить к быстрому переходу реактора в критическое состояние при меньшем вводе реактивности; следовательно, имеется меньше времени для ввода регулирующего стержня или впрыска бора с целью обеспечения управления реактивностью. Данный вопрос следует рассмотреть при проектировании активной зоны и анализе безопасности для всех применимых состояний станции (например, событий, вызванных

ростом реактивности, таких как ожидаемые при эксплуатации события и проектные аварии);

- d) значения эффективных сечений ядерного деления в смешанном оксидном топливе превышают значения эффективных сечений в топливе на основе  $UO_2$ , что может приводить к высоким значениям градиентов нейтронного потока между соседними твэлами, изготовленными из смешанного оксидного топлива и топлива на основе  $UO_2$ . Этот эффект можно уменьшить путем изменения содержания плутония и корректировки картограммы топливной загрузки активной зоны. Другими последствиями различий в сечении между плутонием и ураном являются изменения температурного коэффициента реактивности замедлителя, температурного коэффициента реактивности топлива и пустотного коэффициента реактивности теплоносителя. При проектировании активной зоны и анализе безопасности следует оценивать влияние данных изменений и отражать их в значениях коэффициентов реактивности.

#### *Следящее за нагрузкой маневрирование и маневрирование мощностью*

3.158. Влияние условий эксплуатации, таких как следящее за нагрузкой маневрирование (дополнительную информацию см. в приложении I), маневрирование мощностью, пуск реактора и маневрирование при перегрузке топлива, следует накладывать на динамику распределения уровней энерговыделения и изменения температуры в целях оценки возможного влияния циклических тепловых нагрузок на тепломеханические свойства твэлов, такие как рост давления вследствие выхода газов, образующихся в процессе ядерного распада, в зазор между оболочкой твэла и топливом, а также вследствие усталости оболочки твэла.

3.159. После определения степени необходимой гибкости следует произвести углубленную оценку влияния на проектирование и эксплуатацию атомной электростанции (т.е. требований к анализу безопасности и эксплуатационных пределов и условий). На основе этой оценки могут быть разработаны дополнительные технические условия для аттестации и реализации.

3.160. С целью обеспечения управления реактивностью активной зоны при следящем за нагрузкой маневрировании и маневрировании мощностью следует поддерживать сбалансированность мощности генератора и активной зоны и стабильность работы реактора.

3.161. Следует корректировать пределы безопасной эксплуатации таким образом, чтобы они охватывали возмущения, возникающие при эксплуатации в режиме следящего за нагрузкой маневрирования (дополнительную информацию см. в приложении I).

#### *Эксплуатация реактора с негерметичными твэлами*

3.162. Отказы твэлов могут оказывать влияние на легкость доступа, планирование работ и дозы, получаемые работниками, входящими в состав эксплуатационного персонала станции. Следует обеспечивать, чтобы при эксплуатации активной зоны реактора, в которой присутствуют дефектные твэлы, не нарушались радиохимические требования (дополнительную информацию см. в приложении I), которые задаются пределом активности радионуклидов в теплоносителе, включенным в технические спецификации станции.

3.163. В программе проектирования и эксплуатации активной зоны следует устанавливать процедуры и пределы эксплуатации активной зоны с дефектными тепловыделяющими сборками, соблюдение которых гарантирует, что дозовые ограничения для работников не будут превышены. При превышении радиохимических пределов эксплуатации легководных реакторов эти реакторы следует переводить в режим останова и производить замену всех дефектных тепловыделяющихборок в соответствии с процедурами во время останова. В кипящих реакторах и тяжеловодных реакторах с водой под давлением выход продуктов деления из дефектного топлива и последующее вторичное наводороживание оболочки твэла можно минимизировать путем снижения уровня мощности дефектных твэлов. (Дополнительную информацию см. в приложении I).

#### *Повторное проектирование активной зоны после ремонта тепловыделяющихборок*

3.164. В легководных реакторах тепловыделяющие сборки, содержащие поврежденные и негерметичные твэлы, можно отремонтировать и восстановить с использованием замещающих твэлов, стержней-имитаторов или оставить в них незаполненные места. В целях соблюдения проектных пределов количество таких незаполненных мест следует ограничивать.

3.165. Следует оценивать влияние восстановленной тепловыделяющей сборки на проект активной зоны реактора.

## **Влияние конструкции топлива и управления активной зоной на обращение с топливом, его транспортировку, хранение, переработку и захоронение**

3.166. Проектные пределы определяются на основе концепции глубокоэшелонированной защиты, с тем чтобы обеспечить соблюдение требований по обеспечению безопасности во всех применимых состояниях станции. Проектные пределы по ядерному топливу, описанные в пунктах 3.65–3.76, следует расширить, для того чтобы обеспечить, что твэлы и тепловыделяющие сборки остаются неповрежденными (когда это применимо) или не подвергаются дальнейшей деградации (в случае негерметичных твэлов) на заключительной стадии ядерного топливного цикла, после того как тепловыделяющие сборки будут выгружены из активной зоны. Заключительная стадия ядерного топливного цикла предполагает обращение с ядерным топливом, его транспортировку, переработку и захоронение. На поведение облученных твэлов и тепловыделяющих сборок после выгрузки из активной зоны оказывают влияние следующие характеристики топлива:

- а) Внутреннее давление в твэлах в конце срока службы

Хотя твэлы и могут в определенной степени выдерживать без отказа избыточное давление, превышающее обычное давление теплоносителя в условиях нормальной эксплуатации, обращение с такими находящимися под высоким давлением твэлами может оказаться неприемлемым при снижении противодавления теплоносителя (например, в пунктах хранения отработавшего ядерного топлива). Это особенно актуально для смешанного оксидного топлива различных видов, которое сохраняет высокую температуру в течение более длительного периода времени и продолжает выделять газообразный гелий из топливного материала.

- б) Масштабное наводороживание оболочки твэла и механические свойства оболочки твэла

Локализованное наводороживание (например, вследствие выкрашивания коррозионного слоя или наличия осевых зазоров между таблетками) может не происходить в условиях нормальной эксплуатации или являться следствием возникновения аварийных условий, однако оно может приводить к замедленному гидридному растрескиванию оболочки твэла из циркониевого сплава во время

обращения с топливом или его хранения после выгрузки из активной зоны или к нежелательным отказам в случае аварии во время транспортировки.

с) Коррозионное истирание

Как правило, локализованный износ (например, фреттинг-износ пар решетка — твэл в легководных реакторах и соприкасающихся элементов дистанционирующих конструкций в тяжеловодных реакторах с водой под давлением) не проявляется вплоть до полного изнашивания стенки оболочки твэла и появления течи. Некоторые твэлы, подверженные интенсивному износу, могут проявлять локальную уязвимость, которая может в долгосрочном плане приводить к отказам вследствие ползучести или к другим механическим повреждениям в случае аварии во время транспортировки.

d) Выгорание выгружаемого топлива

Конструкция топлива, управление активной зоной и результирующее выгорание выгружаемого топлива влияют на изотопный вектор топлива, что, в свою очередь, влияет на процессы его переработки и захоронения. Высокие степени выгорания выгружаемого топлива оказывают отрицательное влияние на его изотопный состав и поэтому влияют на реактивность. При использовании смешанного оксидного топлива содержание плутония следует корректировать таким образом, чтобы поддерживать паритет с реактивностью присутствующего в активной зоне топлива на основе  $UO_2$ , до достижения ожидаемого уровня выгорания выгружаемого топлива.

e) Прочие аспекты

Следует обеспечивать, чтобы новые конструкции твэлов и новые конструкции тепловыделяющих сборок, предлагаемые поставщиками топлива для решения других внутриреакторных проблем (например, коррозионного растрескивания оболочки твэла под напряжением, образования газообразных продуктов деления, искривления тепловыделяющих сборок и поведения топлива в аварийных условиях), оставались совместимыми с требованиями, предъявляемыми на заключительной стадии ядерного топливного цикла.

## 4. КВАЛИФИКАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

4.1. Безопасная эксплуатация активной зоны реактора в течение срока службы КСЭ активной зоны реактора, включая твэлы и тепловыделяющие сборки, компоненты активной зоны и системы управления, требует использования надежной программы аттестации, инспекций и испытаний в процессе проектирования и анализа оборудования. Способы решения этой задачи описаны в данном разделе настоящего Руководства по безопасности.

### КВАЛИФИКАЦИЯ ПРОЕКТА

4.2. Следует обеспечивать, чтобы в рамках программы квалификации подтверждалась способность КСЭ активной зоны выполнять свои функции в течение соответствующего периода времени с учетом надлежащих соображений в отношении функциональности и безопасности в заданных условиях эксплуатации (например, давления, температуры, уровней излучения, механических нагрузок и вибрации). В число таких условий окружающей среды следует включать изменения, ожидаемые при нормальной эксплуатации, ожидаемых при эксплуатации событиях, проектных авариях и запроектных условиях без значительной деградации топлива.

4.3. Характеристики определенных постулируемых исходных событий могут препятствовать проведению реалистичных пусконаладочных и периодических испытаний, подтверждающих, что КСЭ выполняют заданные функции безопасности, когда в этом возникнет необходимость, например в случае землетрясения. Для соответствующих КСЭ и рассматриваемых событий следует запланировать и выполнить перед монтажом таких КСЭ соответствующую программу квалификации.

4.4. Следует обеспечивать, чтобы методы квалификации включали:

- a) проведение типовых испытаний КСЭ, репрезентативных для тех КСЭ, которые должны быть поставлены;
- b) проведение испытаний поставленных КСЭ;
- c) использование соответствующего накопленного опыта;

- d) анализ на основе имеющихся и применимых результатов испытаний;
- e) все вышеуказанные способы в любом сочетании.

4.5. Квалификацию проекта можно производить на основе опыта эксплуатации топливных систем такой же или аналогичной конструкции. Следует определить основу использования накопленного опыта и оценить данные о его использовании. В качестве справочной информации следует использовать максимальное выгорание и опыт эксплуатации активной зоны на мощности, а данные о характеристиках тепловыделяющих сборок следует сравнивать с проектными критериями, установленными для таких явлений, как фреттинг-износ, окисление, наводороживание, образование отложений и прогиб тепловыделяющих сборок.

## ИНСПЕКЦИИ

4.6. Следует разработать систему, позволяющую идентифицировать каждую тепловыделяющую сборку, а также обеспечивать ее надлежащую ориентацию в активной зоне. После первой загрузки топлива в активную зону и всех последующих перегрузок следует производить проверки с целью верификации правильности загрузки и позиционирования каждой тепловыделяющей сборки.

## ИСПЫТАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОТОТИПНЫХ И ГОЛОВНЫХ СБОРОК

4.7. При проектировании следует предусматривать проведение эксплуатационных испытаний и контроля с целью обеспечения выполнения активной зоной и связанными с ней конструкциями и системами управления реактивностью и останова установленных функций в течение всего срока их эксплуатации. Дополнительные руководящие материалы по проведению инспекций в процессе эксплуатации изложены в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № NS-G-2.6, «Техническое обслуживание, надзор и инспекции при эксплуатации на атомных электростанциях» [15].

4.8. В тех случаях, когда это практически целесообразно, для определения характеристик новой конструкции следует производить вне реакторные испытания опытных образцов тепловыделяющих сборок. Как правило, в этих целях проводятся следующие вне реакторные испытания:

- a) для легководных реакторов:
  - i) испытания дистанционирующих решеток (в том числе испытания по определению гидравлического сопротивления, испытания на прочность при раздавливании и другие испытания конструкции, такие как испытания на сейсмостойкость);
  - ii) прочностные и эксплуатационные испытания регулирующих стержней;
  - iii) прочностные испытания тепловыделяющих сборок (поперечная, осевая и крутильная жесткость, а также определение собственных частот и демпфирование);
  - iv) гидравлические испытания тепловыделяющих сборок, включая определение гидравлического сопротивления и усилия отрыва тепловыделяющей сборки, вибрации и износа регулирующих стержней, вибрации тепловыделяющей сборки, фреттинга пар решетка — твэл (с учетом релаксации распорных пружин решетки), а также оценку износа и срока службы тепловыделяющих сборок;
  - v) теплогидравлические испытания тепловыделяющих сборок, включая определение корреляций критического теплового потока;
- b) для тяжеловодных реакторов с водой под давлением:
  - i) проверка гидравлического сопротивления системы пучков твэлов;
  - ii) ресурсные испытания при воздействии поперечного потока;
  - iii) испытания на механическую износостойкость;
  - iv) испытания на ударную нагрузку пучка твэлов;
  - v) испытания пучка твэлов на прочность;
  - vi) испытания на износ;
  - vii) испытания в рамках программы сейсмической аттестации;
  - viii) испытания намывкой и смывкой (по мере необходимости);
  - ix) испытания с целью определения запаса до кризиса теплового потока.

4.9. С целью обоснования заданного максимального предела выгорания для новой конструкции следует провести внутриреакторные испытания путем облучения твэлов и сборок в материаловедческих испытательных реакторах или головных тепловыделяющих сборок перспективных конструкций в энергетических реакторах. Это дает возможность исследовать следующие явления:

- a) рост твэлов и стержней с выгорающим поглотителем;
- b) прогиб твэлов;

- c) уровни окисления и наводороживания твэлов, дистанционирующих решеток и топливных каналов (при наличии);
- d) фреттинг пар твэл — дистанционирующая решетка (для тяжеловодных реакторов с водой под давлением)
- e) рост тепловыделяющей сборки;
- f) прогиб тепловыделяющей сборки;
- g) износ и искривление топливного канала (для кипящих реакторов);
- h) образование гофров на твэлах (например, вследствие взаимодействия между топливными таблетками и оболочкой);
- i) целостность твэлов;
- j) релаксация прижимных пружин (для реакторов с водой под давлением);
- k) релаксация пружин дистанционирующих решеток (для легководных реакторов);
- l) износ регулирующих стержней и направляющих каналов (для реакторов с водой под давлением).

4.10. В тех случаях, когда невозможно провести внутрореакторные испытания новых конструкций или новых конструктивных особенностей тепловыделяющих сборок, следует уделять особое внимание аналитическим оценкам и расширенным планам инспекций или наблюдения с целью валидации проектных характеристик и особенностей функционирования топлива.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Безопасность атомных электростанций: проектирование, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-2/1 (Rev. 1), Вена (2016).
- [2] Международное агентство по атомной энергии, Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности: терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты, издание 2018 года, МАГАТЭ, Вена (2023).
- [3] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Применение системы управления для установок и деятельности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GS-G-3.1, МАГАТЭ, Вена (2009).
- [4] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Система управления для ядерных установок, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GS-G-3.5, МАГАТЭ, Вена (2014).
- [5] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Лидерство и менеджмент для обеспечения безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 2, МАГАТЭ, Вена (2017).
- [6] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Детерминистический анализ безопасности атомных электростанций, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-2 (Rev. 1), МАГАТЭ, Вена (2023).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design of Fuel Handling and Storage Systems for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-63, IAEA, Vienna (разрабатывается).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Spent Nuclear Fuel, IAEA Safety Standards Series No. SSG-15 (Rev. 1), IAEA, Vienna (разрабатывается).
- [9] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Проектирование и аттестация сейсмостойких конструкций атомных электростанций, № NS-G-1.6, МАГАТЭ, Вена (2003). (Готовится пересмотренный вариант этой публикации).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-30, IAEA, Vienna (2014).
- [11] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Пределы и условия для эксплуатации и эксплуатационные процедуры для атомных электростанций, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № NS-G-2.2, МАГАТЭ, Вена (2004). (Готовится пересмотренный вариант этой публикации).
- [12] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Управление активной зоной и обращение с топливом на атомных электростанциях, № NS-G-2.5, МАГАТЭ, Вена (2004). (В настоящее время готовится новая редакция этой публикации).
- [13] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Проектирование системы теплоносителя реактора и связанных с ней систем атомных электростанций, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-56, МАГАТЭ, Вена (2024).

- [14] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Проектирование систем контроля и управления для атомных электростанций, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-39, МАГАТЭ, Вена (2018).
- [15] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Техническое обслуживание, надзор и инспекции при эксплуатации на атомных электростанциях, № NS-G-2.6, МАГАТЭ, Вена (2005). (Готовится пересмотренный вариант этой публикации).

## Приложение I

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

I-1. В таблице I-1 представлена дополнительная техническая информация, поясняющая значение терминов, не определенных в Глоссарии МАГАТЭ по вопросам безопасности [I-1], но используемых в настоящем Руководстве по безопасности, и приведены дополнительные примеры, обосновывающие необходимость реализации рекомендаций, содержащихся в настоящем Руководстве по безопасности.

ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Взаимодействие таблеток с оболочкой твэла	Связанное с ползучностью обжатие оболочки твэла и тепловое расширение и газовое распухание топливных таблеток ведут к механическому взаимодействию таблеток с оболочкой твэла во всех применимых состояниях станции. Режим отказа, связанный с механическим взаимодействием таблеток с оболочкой твэла, возникает вследствие исчерпания пластичности оболочки твэла.	3.59
	На таком пониженном уровне мощности твэл считается «восстановившимся» свои прежние свойства. Когда позднее активная зона реактора возвращается в режим эксплуатации на полной мощности, в оболочке твэла возникает напряжение на разрыв. Эти остаточные напряжения увеличивают уязвимость к трещинообразованию от коррозии под напряжением, вызванной взаимодействием таблетки с оболочкой твэла в условиях присутствия в твэле коррозионных продуктов деления.	3.48, 3.61

ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Взаимодействие таблеток с оболочкой твэла	<p>Порог отказа при скачкообразном изменении мощности является нижним граничным значением отказов топлива, вызываемых скачкообразными изменениями мощности, в диапазоне выгорания, называемом «критическим диапазоном выгорания». Для значений выгорания топлива ниже этого «критического диапазона выгорания» зазор между таблеткой и оболочкой твэла остается открытым, поэтому для достижения уровня напряжения в оболочке твэла, сравнимого с условиями, при которых зазор закрыт, изменение мощности должно быть более значительным. Для значений глубины выгорания топлива, превышающих критический диапазон выгорания, опыт показывает, что состав материала на границе раздела между таблеткой и оболочкой твэла, образовавшегося в результате облучения, таков, что концентрация напряжения на внутренней поверхности оболочки твэла снижается, что делает трещинообразование вследствие коррозии под напряжением в оболочке маловероятным. Поскольку критический диапазон выгорания зависит от кинетики смыкания зазора между таблетками и оболочкой твэла, он поэтому зависит от конкретных свойств материала определенного типа оболочки твэла и конструкции твэла.</p>	3.63

ТАБЛИЦА I-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Выгорающий поглотитель	В легководных реакторах для поддержания отрицательного температурного коэффициента замедлителя проектировщик может выбрать добавление фиксированного объема выгорающего поглотителя в топливные таблетки или в тепловыделяющую сборку в виде выгорающих поглощающих стержней с целью снижения требуемой концентрации выгорающего поглотителя в замедлителе. Кроме того, выгорающий поглотитель можно использовать для выравнивания распределения энерговыделения и минимизации скачков реактивности в процессе выгорания топлива.	3.25
Дефектное топливо	При проведении оценок безопасности особое внимание уделяется явлению резкого изменения концентрации йода после переходных процессов на станции. При определенных условиях, предшествующих аварии, возникновение данного явления может приводить к увеличению радиологических последствий постулируемой аварии. Один из подходов при оценке безопасности предусматривает задание предельной активности йода, допустимой в теплоносителе реактора после завершения переходных процессов на станции.	3.162

ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Дефектное топливо	<p>Поведение негерметичных твэлов во время проектных аварий (например, аварий с потерей теплоносителя, аварий, вызванных ростом реактивности, и разрыва трубок парогенератора) может быть специфичным и может потребовать индивидуальной оценки. Например, присутствие негерметичного топлива может не оказывать влияния на значения запаса по безопасности при авариях с потерей теплоносителя, поскольку консервативные допущения задаются в виде требований к оценке радиологических последствий. Присутствие ограниченного количества негерметичных твэлов может не оказывать влияния на проектные пределы аварий, вызванных ростом реактивности, хотя и признается, что негерметичное топливо имеет более низкую сопротивляемость нагрузкам, возникающим при авариях, вызванных ростом реактивности, и, следовательно, его наличие ведет к росту вероятности определенного взаимодействия топлива с теплоносителем.</p>	



ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Запас	<p>В контексте настоящего Руководства по безопасности «запас» означает разницу между проектным пределом, определенным для отдельного физического параметра, и экстремальным (максимальным или минимальным) значением данного физического параметра.</p> <p>Термин «проектные пределы», используемый в настоящем Руководстве по безопасности, включает в себя общепринятые термины «пределы безопасности», «эксплуатационные пределы и условия» и «критерии приемлемости» в соответствии с определениями в Глоссарии МАГАТЭ по вопросам безопасности [1-1].</p>	2.13
	<p>Термин «запас подкритичности» означает мгновенное значение реактивности, при которой реактор остается в подкритическом состоянии в текущих условиях при допущении, что все сборки полноразмерных регулирующих стержней кластерного типа (в реакторах с водой под давлением) или полноразмерные регулирующие стержни (в кипящих и тяжеловодных реакторах с водой под давлением) введены на полную длину, за исключением одной сборки или одного стержня с максимальной эффективностью, которые предполагаются полностью извлеченными.</p>	3.24

ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Компоненты активной зоны	<p>Компоненты активной зоны — это не являющиеся тепловыделяющими сборками элементы активной зоны, которые используются в качестве опорных конструкций активной зоны, или инструменты, устройства или другие узлы, размещаемые внутри активной зоны для мониторинга, контроля расхода или решения других технологических задач и рассматриваемые в качестве элементов активной зоны. Примерами компонентов активной зоны являются устройства управления реактивностью, устройства останова, нейтронные источники, имитаторы тепловыделяющих сборок, топливные каналы, контрольно-измерительные приборы и аппаратура, ограничители потока и выгорающие поглотители [1-1].</p>	3.77
Оболочка твэла	<p>Герметичность оболочки твэла необходима для предотвращения выхода летучих продуктов деления, а ее конструктивная целостность — для поддержания охлаждаемой геометрии и обеспечения возможности выгрузки компонентов из активной зоны с использованием штатного перегрузочного оборудования.</p>	2.4

ТАБЛИЦА I-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Оболочка твэла	<p>Как правило, в качестве материала оболочки твэла используются сплавы на основе циркония (например, циркалой-2, циркалой-4, ZIRLO и оптимизированный ZIRLO, M5, Э110). Для использования в применениях разрабатываются и другие инновационные материалы оболочки твэла, такие как толерантное ядерное топливо, которое должно быть более устойчивым к аварийным условиям с учетом динамики паровых реакций и необходимости снижения образования водорода.</p>	3.5
	<p>Температурно-временной интеграл относится к оценке общего времени до отказа, достигаемого при данной температуре оболочки твэла без возникновения разрушающего окисления (кинетики неконтролируемого окисления).</p>	3.5
	<p>Внутриреакторная коррозия уменьшает несущую толщину оболочки твэла, но наводороживание оболочки твэла, являющееся следствием механизма коррозии, может быть более пагубным явлением, поскольку оно ухудшает физико-механические свойства оболочки твэла. В результате некоторые проектные пределы по ядерному топливу, например применяемые в отношении аварий, вызванных ростом реактивности, или аварий с потерей теплоносителя, выражаются в настоящее время как функция содержания водорода в оболочке твэла, предшествующего началу переходного режима, а не уровня коррозионного износа или выгорания.</p>	3.51

ТАБЛИЦА I-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Оболочка твэла	Коррозия и наводороживание в значительной степени зависят характеристик материала и таких условий эксплуатации, как температура, химический состав теплоносителя и линейное энерговыделение (которое определяет для заданной глубины выгорания допустимое время облучения). Эти условия рабочей среды необходимо учитывать. Для предотвращения ухудшения антикоррозийных свойств материалов следует обеспечить введение требуемого антикоррозийного режима (например, путем поддержания низкого содержания кислорода и соответствующего уровня pH).	3.52

ТАБЛИЦА I-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Обратная связь по реактивности	<p>Присущие активной зоне реактора нейтронно-физические характеристики, как правило, описываются следующими типами обратной связи по реактивности или коэффициентами реактивности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— обратная связь по реактивности вследствие изменений температуры топлива (т.е. температурного коэффициента реактивности топлива или доплеровского коэффициента);</li> <li>— обратная связь по реактивности вследствие изменений температуры теплоносителя или замедлителя, в том числе связанных с плотностью теплоносителя или замедлителя (т.е. температурных коэффициентов реактивности теплоносителя и замедлителя);</li> <li>— обратная связь по реактивности вследствие изменений паросодержания в теплоносителе или замедлителе (т.е. пустотных коэффициентов реактивности теплоносителя и замедлителя);</li> <li>— обратная связь по реактивности вследствие изменений концентрации бора в теплоносителе или замедлителе (т.е. борных коэффициентов реактивности теплоносителя и замедлителя);</li> <li>— доля запаздывающих нейтронов и время жизни мгновенных нейтронов;</li> <li>— влияние перераспределения энерговыделения на реактивность (например, эффективность ксенона и плотность замедлителя);</li> <li>— распад ксенона и других поглотителей нейтронов при анализе долгосрочного поведения активной зоны.</li> </ul>	3.16

ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Останов	<p>Самая простая общепринятая конструкция отказоустойчивой системы останова предполагает удержание устройств останова над активной зоной с помощью активных средств. При условии, что направляющие конструкции устройства останова ничем не заблокированы, эти устройства в случае отключения удерживающих их активных средств (например, при прекращении подачи тока на удерживающий электромагнит) падают в активную зону под действием силы тяжести. Данное положение не применимо к кипящим реакторам.</p>	3.112 (с)
	<p>Общая эффективность устройств останова является функцией расстояния между этими устройствами, а также их положения в реакторе. Когда два устройства расположены близко друг к другу, их суммарная эффективность меньше, чем сумма их индивидуальных эффективностей.</p>	3.115 (f)

ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Следящее за нагрузкой маневрирование	<p>Термин «следящее за нагрузкой маневрирование» означает работу реактора в таком режиме, при котором производство электроэнергии соответствует меняющемуся спросу на электроэнергию. Следящее за нагрузкой маневрирование подразумевает работу с маневрированием мощностью на уровнях ниже номинальной тепловой мощности, поэтому общее количество производимой электроэнергии меньше той, которая производится во время эксплуатации энергоблока при относительно постоянной базовой нагрузке. Работа в режиме следящего за нагрузкой маневрирования может потребовать дополнительных объемов технического обслуживания и контроля и может осложнить оценку надежности и старения некоторых конструкций, систем и элементов.</p>	3.158
	<p>Во время работы в режиме следящего за нагрузкой маневрирования перераспределение плотности энерговыделения происходит вследствие перемещения регулирующих стержней, однако это инициирует неустойчивые процессы перераспределения за счет эффектов обратной связи, оказывающих влияние на состояние теплоносителя и распределение ксенона в реакторе. Это вызывает изменение распределения плотности энерговыделения, характеризуемые по сравнению с исходным невозмущенным состоянием более высокими пиковыми значениями плотности энерговыделения (и/или более низким коэффициентом запаса до кризиса кипения).</p>	3.161

ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Теплоноситель	<p>Для обеспечения второй системы управления реактивностью активной зоны можно использовать в качестве нейтронных поглотителей химические добавки в теплоноситель (например, борную кислоту в реакторах с водой под давлением). Кроме того, для предотвращения коррозии или растрескивания компонентов активной зоны и внутрикорпусных устройств реактора и тем самым для уменьшения загрязнения системы теплоносителя реактора вследствие образования коррозионных отложений могут применяться другие добавки (например, Zn, H, Li, Cu), регулирующие химический состав теплоносителя (например, для регулирования pH и содержания кислорода).</p>	3.6
	<p>Активность теплоносителя реактора измеряется устройством, относящимся к системе подпитки и водоочистки теплоносителя первого контура (более подробную информацию см. в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-56, «Проектирование системы теплоносителя реактора и связанных с ней систем атомных электростанций» [1-2]).</p>	3.130 (f)

ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Топливный канал	В кипящих реакторах перепад давления между внешней и внутренней границами топливного канала может вызывать прогиб и раздутие топливного канала. Такая деформация канала, а также прогиб оболочки твэла могут стать причинами возникновения локальных скачкообразных изменений нейтронного потока и трения, влияющего на перемещение сборки управления реактивностью.	3.57 (а)
Топливо	Под «топливом», если не оговорено иное, понимают топливную матрицу, твэлы и/или тепловыделяющие сборки.	1.4
	«Твэл» означает тепловыделяющий элемент, прутковый тепловыделяющий элемент или любую другую конструкцию, содержащую топливные таблетки.	1.4
	«Тепловыделяющей сборкой» также называют пучок твэлов в тяжеловодных реакторах с водой под давлением.	1.4
	Разрабатываются инновационные топливные материалы, например усовершенствованное устойчивое к авариям (толерантное) топливо с более благоприятной паровой реакцией и менее высоким образованием водорода.	1.6

ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Топливо	<p>«Топливная матрица» означает структуру и микроструктуру различных типов керамических топливных таблеток.</p> <p>Примерами материалов, используемых в топливных таблетках, являются:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— обогащенный UO<sub>2</sub>;</li> <li>— природный UO<sub>2</sub> (для использования в тяжеловодных реакторах с водой под давлением);</li> <li>— смешанное оксидное топливо (UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>);</li> <li>— топливо на основе тория, например ThO<sub>2</sub>, смешанный с торием UO<sub>2</sub>, смешанное оксидное топливо с добавлением тория;</li> <li>— переработанный UO<sub>2</sub>;</li> <li>— топливные таблетки с различными присадками (например, Cr, Al, Si) для улучшения эксплуатационных характеристик (для использования в легководных реакторах).</li> </ul> <p>Материал выгорающего поглотителя (например, Gd, Dy, V, Er) добавляется в спекаемое вещество топливных таблеток из UO<sub>2</sub> или используется для покрытия их поверхности в целях временного подавления избыточной реактивности, появляющейся в результате высокой концентрации в топливе делящегося материала.</p>	2.4
		3.4



ТАБЛИЦА 1-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
Топливо	<p>Изотопный состав и содержание плутония в смешанном оксидном топливе сильно зависят от глубины выгорания топлива выгружаемых отработавших теплоделяющих сборок, из которых был извлечен плутоний. Пропорции делящихся изотопов для плутония также варьируются, что, в свою очередь, влияет на характеристики активной зоны реактора. Кроме того, в проектах активных зон со смешанным оксидным топливом следует учитывать вектор плутония (<math>^{238}\text{Pu}</math>, <math>^{239}\text{Pu}</math>, <math>^{240}\text{Pu}</math>, <math>^{241}\text{Pu}</math>, <math>^{241}\text{Am}</math>) при понимании, что происходят изменения, влияющие на реактивность и ключевые параметры ядерной безопасности в зависимости от срока начала эксплуатации смешанного оксидного топлива после его производства. Данные особенности необходимо иметь в виду при проектировании активной зоны и проведении анализа безопасности.</p>	3.157 (a)
Управление	<p>Ниже перечислены типы устройств управления реактивностью, используемых для регулирования реактивности активной зоны распределения энерговыделения в реакторах различных конструкций:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— в реакторах с водой под давлением: <ul style="list-style-type: none"> <li>• использование твердых стержней-поглотителей нейтронов;</li> </ul> </li> </ul>	3.23, 3.94

ТАБЛИЦА I-1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ (продолжение)

Термин	Пояснение	Соответствующие пункты в настоящем Руководстве по безопасности
<ul style="list-style-type: none"> <li>● использование растворимого поглотителя в замедлителе или теплоносителе;</li> <li>● использование топлива с распределенным или дискретным выгорающим поглотителем;</li> <li>● использование картограмм загрузки и перегрузки топлива;</li> <li>— в кипящих реакторах:</li> <li>● использование твердых пластин-поглотителей нейтронов;</li> <li>● регулирование расхода теплоносителя (плотности замедлителя);</li> <li>● использование топлива с распределенным или дискретным выгорающим поглотителем;</li> <li>● использование картограмм загрузки и перегрузки топлива;</li> <li>— в тяжеловодных реакторах с водой под давлением:</li> <li>● использование твердотельных стержней-поглотителей нейтронов;</li> <li>● использование растворимого поглотителя в замедлителе;</li> <li>● регулирование температуры замедлителя;</li> <li>● регулирование высоты замедлителя (в тяжеловодных реакторах с водой под давлением канального типа предьдущих проектов);</li> <li>● использование жидкого поглотителя в каналах;</li> <li>● использование перегрузки на мощности.</li> </ul>		

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К ПРИЛОЖЕНИЮ I**

- [I-1] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности: терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты, издание 2018 года, МАГАТЭ, Вена (2023).
- [I-2] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Проектирование системы теплоносителя реактора и связанных с ней систем атомных электростанций, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-56, МАГАТЭ, Вена (2024).

## Приложение II

### АСПЕКТЫ, КОТОРЫЕ НЕОБХОДИМО УЧИТЫВАТЬ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТВЭЛОВ, ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК, СБОРОК УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОСТЬЮ, СБОРОК НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ И СБОРОК ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЗАГЛУШЕК

#### ТВЭЛЫ

II-1. При проектировании твэлов необходимо учитывать перечисленные ниже аспекты:

- a) оболочка твэла:
  - вибрация и износ твэла (например, фреттинг-износ пар решетка — твэл в легководных реакторах и соприкасающихся элементов дистанционирующих конструкций в тяжеловодных реакторах с водой под давлением);
  - оценка эволюции механических свойств оболочки твэла при облучении (нагрузки, вызванные смещениями (атомов под облучением) и давлением);
  - материалы и оценка химических свойств;
  - коррозия под напряжением;
  - циклические нагрузки и усталость;
  - геометрическая и химическая стабильность оболочки твэла при облучении;
- b) материал ядерного топлива (включая выгорающие поглотители);
  - стабильность геометрических размеров топлива в условиях облучения;
  - уплотнение ядерного топлива (кинетика и амплитуда);
  - возможность химического взаимодействия с оболочкой твэла и теплоносителем;
  - образование газообразных продуктов деления и их распределение внутри топливных таблеток;
  - кинетика выхода газообразных продуктов деления;
  - газовое распухание;
  - тепломеханические свойства в условиях облучения;
  - изменения микроструктуры под влиянием облучения.

с) характеристики твэлов:

- температуры таблеток и оболочки твэла и распределения температур;
- кинетика и амплитуда закрытия зазора между таблетками и оболочкой твэла (для учета вопросов, связанных с взаимодействием между таблетками и оболочкой твэла);
- влияние облучения на поведение твэлов (например, изменение структуры топлива, растрескивание топливных таблеток, набухание в результате воздействия твердых и газообразных продуктов деления, выход газообразных продуктов деления и рост давления внутри твэлов, ухудшение теплопроводности твэлов);
- прогиб твэлов;
- рост твэлов.

Характеристики твэлов демонстрируются с помощью проверенных расчетных моделей и/или репрезентативных экспериментальных данных, собранных в результате выполнения программ испытаний, или данных, полученных от других атомных электростанций (относительно головных твэлов или головных тепловыделяющих сборок). Используемые модели, как правило, зависят от глубины выгорания.

## ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ

II-2. Компоненты тепловыделяющихборок (например, головка и хвостовик, направляющие каналы, дистанционирующие устройства, перемешивающие решетки, пружины решетки, соединения и система прижима тепловыделяющей сборки в реакторах с водой под давлением) необходимо проектировать с учетом следующих условий и нагрузок:

- нагрузок фиксирующей системы активной зоны;
- гидродинамических нагрузок;
- теплогидравлических нагрузок (например, кризиса теплообмена при кипении);
- нагрузок, возникающих при авариях (например, при авариях с потерей теплоносителя) и вследствие сейсмических воздействий;
- нагрузок, возникающих при обращении и транспортировке;
- прогиба тепловыделяющихборок.

## СБОРКИ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОСТЬЮ

II-3. При проектировании сборок управления реактивностью следует учитывать указанные ниже аспекты:

- внутреннее давление и соответствующие напряжения оболочки твэла в условиях нормальной эксплуатации, во время переходных режимов и в аварийных условиях;
- термическое расширение и радиационное распухание;
- эволюцию материалов поглотителя и оболочки твэла под действием облучения;
- влияние фреттинг-износа на устойчивость оболочки твэла.

## СБОРКИ НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

II-4. При проектировании сборок нейтронных источников следует учитывать указанные ниже аспекты:

- a) радиационные эффекты;
- b) эффективность для учета эффектов экранирования при выгорании периферийных тепловыделяющих сборок;
- c) внешние события, такие как землетрясения.

## СБОРКИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЗАГЛУШЕК

II-5. При проектировании сборок гидравлических заглушек следует учитывать указанные ниже аспекты:

- a) взаимодействие с направляющими трубками вследствие теплового расширения и радиационного распухания;
- b) влияние на байпасирование потока теплоносителя (в реакторах с водой под давлением);
- c) влияние фреттинг-износа на устойчивость направляющих каналов.



## СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ

Asfaw, K.	Международное агентство по атомной энергии
Kamimura, K.	Управление по ядерному регулированию, Япония
Nakajima, T.	Управление по ядерному регулированию, Япония
Schultz, S.	Комиссия по ядерному регулированию США, Соединенные Штаты Америки
Shaw, P.	Международное агентство по атомной энергии
Sim, K.	Международное агентство по атомной энергии
Suk, H.	Канадская комиссия по ядерной безопасности, Канада
Toth, C.	Международное агентство по атомной энергии
Waeckel, N.	Électricité de France, Франция
Yllera, J.	Международное агентство по атомной энергии
Zhang, J.	Tractebel, Бельгия





# Обеспечение безопасности с помощью международных норм

ISBN 978-92-0-453023-0



9 789204 530230

**МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ  
ВЕНА**