

# СЕРИЯ НОРМ МАГАТЭ ПО БЕЗОПАСНОСТИ

Проектирование  
и аттестация  
сейсмостойких  
конструкций  
для атомных  
электростанций

## РУКОВОДСТВО

№ NS-G-1.6



**IAEA**

Международное агентство по атомной энергии

Настоящая публикация была заменена публикацией SSG-67.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И  
АТТЕСТАЦИЯ СЕЙСМОСТОЙКИХ  
КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ АТОМНЫХ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

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

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

Настоящая публикация была заменена публикацией SSG-67.

Серия норм по безопасности, № NS-G-1.6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И  
АТТЕСТАЦИЯ СЕЙСМОСТОЙКИХ  
КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ АТОМНЫХ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ  
РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ  
ВЕНА, 2008 ГОД

## УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

Все научные и технические публикации МАГАТЭ защищены в соответствии с положениями Всемирной конвенции об авторском праве в том виде, как она была принята в 1952 году (Берн) и пересмотрена в 1972 году (Париж). 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, должно быть получено разрешение, которое обычно является предметом соглашений о роялти. Предложения о некоммерческом воспроизведении и переводе приветствуются и рассматриваются в каждом отдельном случае. Вопросы следует направлять в Издательскую секцию МАГАТЭ по адресу:

Группа продажи и рекламы  
Издательская секция  
Международное агентство по атомной энергии  
Wagramer Strasse 5  
P.O. Box 100  
1400 Vienna, Austria  
факс: +43 1 2600 29302  
тел.: +43 1 2600 22417  
эл. почта: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)  
веб-сайт: <http://www.iaea.org/books>

© МАГАТЭ, 2008  
Напечатано МАГАТЭ в Австрии  
Апрель 2008

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И АТТЕСТАЦИЯ СЕЙСМОСТОЙКИХ  
КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ  
МАГАТЭ, ВЕНА, 2008  
STI/PUB 1158  
ISBN 978-92-0-404308-2  
ISSN 1020-5845

## ПРЕДИСЛОВИЕ

**Мохамед ЭльБарадей**  
**Генеральный директор**

Одна из уставных функций МАГАТЭ сводится к тому, чтобы устанавливать или применять нормы безопасности для охраны здоровья, жизни и имущества в деятельности по освоению и применению ядерной энергии в мирных целях, а также обеспечивать применение этих норм как в своей собственной работе, так и в работе, в которой оказывается помощь, и, по требованию сторон, в деятельности, проводимой на основании любого двустороннего или многостороннего соглашения, или, по требованию того или иного государства, к любому виду деятельности этого государства в области ядерной энергии.

Наблюдение за разработкой норм безопасности осуществляют следующие консультативные органы: Консультативная комиссия по нормам безопасности (ККНБ); Комитет по нормам ядерной безопасности (НУССК); Комитет по нормам радиационной безопасности (РАССК); Комитет по нормам безопасности перевозки (ТРАНССК); и Комитет по нормам безопасности отходов (ВАССК). Государства-члены широко представлены в этих комитетах.

Чтобы обеспечить широчайший международный консенсус, нормы безопасности направляются также всем государствам-членам для замечаний перед их одобрением Советом управляющих МАГАТЭ (в случае Основ безопасности и Требований безопасности) или, от имени Генерального директора, Комитетом по публикациям (в случае Руководств по безопасности).

Нормы безопасности МАГАТЭ не имеют юридически обязательной силы для государств-членов, но они могут приниматься ими по их собственному усмотрению для использования в национальных регулирующих положениях, касающихся их собственной деятельности. Эти нормы обязательны для МАГАТЭ в отношении его собственной работы и для государств в отношении операций, в которых МАГАТЭ оказывает помощь. Любое государство, желающее вступить в соглашение с МАГАТЭ, касающееся его помощи в связи с выбором площадки, проектированием, строительством, вводом в эксплуатацию, эксплуатацией или снятием с эксплуатации ядерной установки или любой другой деятельностью, должно будет выполнять те части норм безопасности, которые относятся к деятельности, охватываемой соглашением. Однако следует помнить, что ответственность за принятие окончательных решений и юридическая ответственность в любых процедурах лицензирования возлагается на государства.

Нормы безопасности устанавливают важнейшие основы для безопасности, однако может также потребоваться включение более детальных требований, отражающих национальную практику. Кроме того, будут включаться, как правило, специальные вопросы, которые должны оцениваться на индивидуальной основе.

Физическая защита делящихся и радиоактивных материалов и АЭС в целом упоминается в надлежащих случаях, но не рассматривается подробно; к обязательствам государств в этом отношении следует подходить на основе соответствующих договорно-правовых документов и публикаций, разработанных под эгидой МАГАТЭ. Нерадиологические аспекты техники безопасности на производстве и охраны окружающей среды также прямо не рассматриваются; признано, что государства должны выполнять свои международные обязательства и обязанности относительно них.

Требования и рекомендации, изложенные в нормах безопасности МАГАТЭ, возможно, не полностью соблюдаются на некоторых установках, построенных в соответствии с принятыми ранее нормами. Решения о том, как нормы безопасности должны применяться на таких установках, будут приниматься государствами.

Внимание государств обращается на тот факт, что нормы безопасности МАГАТЭ, не являясь юридически обязательными, разработаны с целью обеспечения того, чтобы мирные применения ядерной энергии и радиоактивных материалов осуществлялись таким образом, который дает возможность государствам выполнять свои обязательства в соответствии с общепринятыми принципами международного права и правилами, касающимися охраны окружающей среды. Согласно одному такому общему принципу территория государства не должна использоваться так, чтобы причинить ущерб в другом государстве. Государства, следовательно, обязаны проявлять должную осмотрительность и соответствующую меру заботливости.

Гражданская ядерная деятельность, осуществляемая в рамках юрисдикции государств, как и любая другая деятельность, подпадает под действие обязательств, которые государства могут принимать согласно международным конвенциям в дополнение к общепринятым принципам международного права. Государствам надлежит принимать в рамках своих национальных правовых систем такое законодательство (включая правила) и другие нормы и меры, которые могут быть необходимы для эффективного выполнения всех взятых на себя международных обязательств.

#### *РЕДАКЦИОННОЕ ПРИМЕЧАНИЕ*

*Дополнение, если оно включено, представляет собой неотъемлемую часть норм и имеет тот же статус, что и основной текст. Приложения, сноски и списки литературы, если они включены, содержат дополнительную информацию или практические примеры, которые могут оказаться полезными для пользователя.*

*Формулировка “должен, должна, должно, должны” используется в нормах безопасности в случаях, когда речь идет о требованиях, обязанностях и обязательствах. Использование формулировки “следует” означает рекомендацию желательного варианта.*

*Официальным текстом является английский вариант.*



Настоящая публикация была заменена публикацией SSG-67.

## СОДЕРЖАНИЕ

|    |                                                                                           |    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | ВВЕДЕНИЕ .....                                                                            | 1  |
|    | Общие сведения (1.1–1.5) .....                                                            | 1  |
|    | Цель (1.6) .....                                                                          | 2  |
|    | Область применения (1.7–1.12) .....                                                       | 3  |
|    | Структура (1.13) .....                                                                    | 4  |
| 2. | ОБЩИЕ КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ .....                                                        | 5  |
|    | Область применения (2.1–2.2) .....                                                        | 5  |
|    | Проектные землетрясения (2.3–2.10) .....                                                  | 5  |
|    | Категоризация сейсмостойкости конструкций, систем<br>и элементов (2.11–2.26) .....        | 7  |
|    | Сочетание сейсмических нагрузок с<br>нагрузками в условиях эксплуатации (2.27–2.30) ..... | 12 |
|    | Сейсмостойкость (2.31–2.38) .....                                                         | 14 |
|    | Соображения, связанные с запроектными событиями (2.39–2.40) ...                           | 17 |
|    | Содержание отчета по обоснованию безопасности (2.41) .....                                | 17 |
| 3. | ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКИХ КОНСТРУКЦИЙ .....                                            | 18 |
|    | Выбор соответствующей компоновки станции (3.1–3.5) .....                                  | 18 |
|    | Геотехнические параметры (3.6) .....                                                      | 19 |
|    | Строительные конструкции (3.7) .....                                                      | 20 |
|    | Земляные сооружения (3.8–3.10) .....                                                      | 21 |
|    | Трубопроводы и оборудование (3.11–3.13) .....                                             | 22 |
|    | Выбор соответствующих норм проектирования (3.14–3.17) .....                               | 24 |
|    | Периодическое рассмотрение безопасности (3.18–3.20) .....                                 | 25 |
| 4. | ОБЩИЕ ВОПРОСЫ АТТЕСТАЦИИ<br>СЕЙСМОСТОЙКОСТИ (4.1–4.10) .....                              | 26 |
| 5. | АТТЕСТАЦИЯ МЕТОДОМ АНАЛИЗА .....                                                          | 29 |
|    | Методы моделирования (5.1–5.39) .....                                                     | 29 |
|    | Аналитические методы (5.40–5.57) .....                                                    | 39 |

|    |                                                                                                                                                                |    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6. | АТТЕСТАЦИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ПОСРЕДСТВОМ<br>ИСПЫТАНИЙ, НА ОСНОВЕ ОПЫТА, ПОЛУЧЕННОГО<br>В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, И<br>С ПОМОЩЬЮ КОСВЕННЫХ МЕТОДОВ. .... | 43 |
|    | Аттестация сейсмостойкости посредством испытаний (6.1–6.28) ...                                                                                                | 43 |
|    | Аттестация сейсмостойкости на основе опыта, полученного<br>в условиях реальных землетрясений (6.29–6.31). ....                                                 | 50 |
|    | Аттестация сейсмостойкости<br>с помощью косвенных методов (6.32–6.37). ....                                                                                    | 51 |
| 7. | СЕЙСМИЧЕСКИЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ<br>ПРИБОРЫ. ....                                                                                                         | 53 |
|    | Введение (7.1–7.3) ....                                                                                                                                        | 53 |
|    | Сейсмический мониторинг сооружений (7.4–7.5) ....                                                                                                              | 54 |
|    | Сейсмический мониторинг и автоматические системы<br>быстрого останова (7.6–7.10). ....                                                                         | 55 |
|    | Обработка данных (7.11–7.13). ....                                                                                                                             | 56 |
|    | Меры, принимаемые после землетрясения (7.14–7.19) ....                                                                                                         | 57 |
|    | ДОПОЛНЕНИЕ: ПРИМЕРЫ РАЗБИЕНИЯ ПО КАТЕГОРИЯМ<br>СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ....                                                                                            | 59 |
|    | СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ....                                                                                                                                      | 61 |
|    | СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ. ....                                                                                                                                 | 63 |
|    | ОРГАНЫ, УЧАСТВУЮЩИЕ В ОДОБРЕНИИ НОРМ<br>БЕЗОПАСНОСТИ ....                                                                                                      | 65 |

## 1. ВВЕДЕНИЕ

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Настоящее руководство по безопасности было подготовлено в соответствии с программой МАГАТЭ по разработке норм безопасности для атомных электростанций. Оно дополняет публикацию категории Требований безопасности «Безопасность атомных электростанций: проектирование» [1].

1.2. Настоящее руководство по безопасности заменяет руководство по безопасности «Проектирование и аттестация сейсмостойких конструкций для атомных электростанций», выпущенное в 1998 году.<sup>1</sup> Руководство по безопасности, посвященное проектированию сейсмостойких конструкций, было первоначально выпущено в 1979 году в качестве публикации Серии изданий по безопасности, № 50-SG-S2<sup>2</sup>, в которой учет вопросов сейсмостойкости при выборе площадок атомных электростанций был распространен на области проектирования и аттестации. В настоящем руководстве по безопасности, посвященном проектированию сейсмостойких конструкций, сделаны ссылки на руководство по безопасности [2]<sup>3</sup>, в котором приведены руководящие материалы по определению сейсмической опасности для атомной электростанции, расположенной на определенной площадке.

1.3. Руководство по безопасности «Проектирование и аттестация сейсмостойких конструкций для атомных электростанций», выпущенное в 1998 году<sup>1</sup>, было пересмотрено в 1999-2000 годах с целью включения новых рекомендаций, являющихся результатом учета недавнего эксплуатационного опыта, анализа ущерба, причиненного промышленным установкам недавними землетрясениями, и появления новых научных данных об аналитических подходах и их надежности. Текст был также пересмотрен с целью обеспечения совместимости с другими пересмотренными руководствами по

---

<sup>1</sup> МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Проектирование и аттестация сейсмостойких конструкций для атомных электростанций, Серия изданий по безопасности, No 50-SG-D15, МАГАТЭ, Вена (1998).

<sup>2</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Seismic Analysis and Testing of Nuclear Power Plants, Safety Series No. 50-SG-S2, IAEA, Vienna (1979).

<sup>3</sup> Документ [2] заменяет публикацию МЕЖДУНАРОДНОГО АГЕНТСТВА ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «Учет землетрясений и связанных с ними явлений при выборе площадок для атомных станций», Серия изданий по безопасности № 50-SG-S1 (Rev.1), МАГАТЭ, Вена (1994).

безопасности [2, 3] как следствие изменения подхода к охвату вопросов оценки опасности и вопросов проектирования (для оснований и надземной части сооружений).

1.4. В других руководствах по безопасности, дополняющих публикацию по требованиям безопасности «Безопасность атомных электростанций: проектирование» [1], содержатся рекомендации относительно внешних событий, и в этом смысле они дополняют настоящее руководство по безопасности. В частности, поскольку в документе [4] рассматриваются общие процедуры проектирования с учетом внешних событий, настоящее руководство по безопасности выпускается с целью рассмотрения более конкретного случая этого более общего подхода, который следует рассматривать в качестве эталонной основы в плане аспектов безопасности. В справочных материалах [3] рассматривается проектирование фундаментов и представлены рекомендации и руководящие материалы по оценке эффектов взаимодействия грунта и сооружений и разжижения грунтов.

1.5. В других руководствах по безопасности представлены рекомендации, касающиеся сценария землетрясения, но в связи с проектированием конкретных систем станции: в [5] рассматривается система теплоносителя реактора, в [6] – система защитной оболочки, в [7] – система аварийного энергоснабжения, а в [8] – контрольно-измерительные приборы и системы управления.

## ЦЕЛЬ

1.6. Цель настоящего руководства по безопасности состоит в том, чтобы изложить рекомендации относительно общепринятых методик проектирования атомной станции, так чтобы возможное землетрясение на площадке, которая была выбрана в соответствии с руководством [2], не ставило под угрозу безопасность станции. В нем также содержатся руководящие материалы по последовательному применению методов и процедур для анализа, испытаний и аттестации конструкций и оборудования, с тем чтобы они отвечали требованиям безопасности, предусмотренным в [1]. В руководстве [1] рассмотрены вопросы проектирования атомных станций, оценки безопасности для проектирования и вопросы регулирования, связанные с лицензированием станций.

## ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.7. Настоящее руководство по безопасности предназначено для применения при проектировании наземных стационарных атомных электростанций с водоохлаждаемыми реакторами таким образом, чтобы они выдерживали характерные для конкретной площадки землетрясения независимо от силы колебания грунта при землетрясении или риска, создаваемого для отдельных узлов станции, при условии выполнения изложенных в [2] рекомендаций, касающихся критериев исключения площадки в связи с опасностью.

1.8. Признано, что в отношении некоторых из рекомендованных методов проектирования и проверки могут применяться упрощенные процедуры. Адекватность таких процедур для целей обеспечения безопасности следует определять применительно к конкретным обстоятельствам и следует надлежащим образом оценивать с точки зрения безопасности.

1.9. Следует также отметить, что обычно существует несколько возможных инженерно-технических решений проблем и что подход, принятый для одной атомной станции, может обусловить значительное отличие проекта этой станции от проекта другой станции, для которой был принят другой подход. Настоящее руководство по безопасности базируется на общепринятой практике в государствах-членах. Рекомендуемая основа для оценки сейсмической безопасности при проектировании станции представлена в [9].

1.10. Вероятностная оценка сейсмостойкости атомной электростанции выходит за рамки настоящего руководства по безопасности. Соответствующие требования и рекомендации приведены в [1, 9]. Настоящее руководство по безопасности предназначено для применения при проектировании и строительстве новых атомных электростанций и, как правило, его не следует применять при повторной оценке сейсмостойкости существующих станций. Оценка запаса сейсмостойкости существующих станций выходит за рамки настоящего руководства по безопасности; такую оценку следует проводить в соответствии с общими процедурами, кратко изложенными в [10].

1.11. Рекомендации настоящего Руководства по безопасности могут также применяться и к другим типам реакторов, помимо водоохлаждаемых реакторов стационарных атомных станций. Однако для оценки их применимости следует проводить инженерно-техническую экспертизу с учетом конкретных целей безопасности, определенных для данного типа станций.

1.12. Содержащиеся в настоящем руководстве по безопасности технические рекомендации относительно моделирования и аттестации оборудования могут также частично применяться при проектировании способности станции противостоять воздействию колебательных явлений, вызываемых иными источниками, помимо землетрясений, такими, как взрывы на промышленных установках, падения летательных аппаратов, взрывы в карьерах или аварии оборудования с высокой скоростью вращения [4]. Однако при таком расширении использования следует проявлять осторожность и следует проводить инженерно-техническую экспертизу, особенно в том, что касается частоты индуцированных колебаний, их продолжительности, направления и механизма их воздействия на станцию. Следует также отметить, что проектные решения, обеспечивающие устойчивость к воздействию таких нагрузок, могут быть самыми различными, например, такими, как использование защитных стен, или могут охватывать различные виды отказов, такие, как раскалывание или растрескивание при воздействии динамических нагрузок. Эти конкретные инженерно-технические решения не рассматриваются в настоящем руководстве по безопасности.

## СТРУКТУРА

1.13. В разделе 2 обсуждается влияние, оказываемое на безопасность процессом проектирования и связанными с ним критериями приемлемости, требуемыми для различных классов безопасности. В разделе 3 приведены рекомендации по принципам проектирования для достижения цели защиты и обсуждается связь концепции периодического рассмотрения безопасности с вопросами проектирования. Руководящие материалы по соответствующему выбору методов аттестации сейсмостойкости содержатся в разделе 4, рекомендации относительно аттестации методом анализа приведены в разделе 5, а в разделе 6 обсуждается аттестация методом испытаний. В разделе 7 представлены руководящие материалы по рекомендованным сейсмическим контрольно-измерительным приборам и по соответствующим процедурам мониторинга и их связи с проектными допущениями.

## 2. ОБЩИЕ КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ

### ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

2.1. В настоящем разделе изложены рекомендации по определению категорий конструкций, систем и элементов (КСЭ) атомной электростанции с учетом их важности для безопасности в случае проектного землетрясения, в соответствии с требованиями, установленными в документе «Безопасность атомных электростанций: проектирование» [1]. Приведены также рекомендации относительно применения норм проектирования, с тем чтобы гарантировать соответствующий запас безопасности при проектировании.

2.2. Необходимо разработать и внедрить программу обеспечения качества узлов, услуг и процессов, влияющих на безопасность и охватываемых областью применения настоящего руководства по безопасности ([1], пункты 3.14–3.16). Необходимо внедрить программу обеспечения качества, обеспечивающую правильное выполнение работ по сбору данных, обработке данных, проведению исследований, анализов и аттестации, обоснованию и проверке кодов (программного обеспечения) и другой деятельности, необходимой для выполнения рекомендаций настоящего руководства по безопасности [11, 12].

### ПРОЕКТНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

2.3. Согласно [2], для каждой станции, расположенной в сейсмически опасном районе, следует проводить оценку двух уровней опасности колебаний грунта. Согласно процедурам, кратко изложенным в [2], и согласно целевым уровням вероятности, определенным для проекта станции<sup>4</sup>, для обоих уровней опасности следует определить ряд проектных землетрясений, разбитых на две группы, сейсмический уровень 1 (SL-1) и сейсмический уровень 2 (SL-2).

---

<sup>4</sup> В некоторых государствах SL-2 соответствует уровню, вероятность превышения которого находится в диапазоне от  $1 \times 10^{-3}$  до  $1 \times 10^{-4}$  (средние значения) или от  $1 \times 10^{-4}$  до  $1 \times 10^{-5}$  (медиана) на реакторо-год, а SL-1 соответствует уровню, вероятность которого превышает  $1 \times 10^{-2}$  (среднее значение) на реакторо-год.



2.4. При проектировании станций SL-2<sup>5</sup> связан с самыми строгими требованиями безопасности, в то время как SL-1 соответствует менее тяжелому, более вероятному уровню землетрясения, которое обычно имеет иные последствия для безопасности. В целом SL-1 используется в требованиях, относящихся к сочетаниям нагрузок (когда, по причинам, связанным с вероятностями, другие события сочетаются с землетрясением более низкой интенсивности), послеаварийным инспекциям и национальному лицензированию<sup>6</sup>. Для низких уровней сейсмической опасности, SL-1 обычно не связан с требованиями безопасности, а связан только с эксплуатационными требованиями. Классифицированные в точки зрения безопасности узлы следует проектировать со ссылкой либо на SL-1, либо на SL-2, в соответствии с их функцией безопасности (обычно связанной с SL-2), и на эксплуатационные требования, например, в отношении эксплуатационной готовности или лицензирования<sup>7</sup> (обычно связанные с SL-1).

2.5. В том случае, когда для оценки опасности или непосредственно для задания основы проекта выбран детерминированный подход, следует сделать оценку соответствующего периода повторения, по крайней мере с целью получения возможности сравнения с национальными нормами проектирования промышленных установок. Это значение следует затем оценивать на этапе оценки безопасности, как рекомендовано в [9].

2.6. Согласно общепринятой практике, с каждым уровнем опасности, SL-1 и SL-2, связывают более чем одно проектное землетрясение, причем каждое из них характерно для потенциальной сейсмогенной зоны. Все это следует учитывать при проектировании, и по результатам следует построить соответствующую огибающую.

---

<sup>5</sup> Этот уровень соответствует уровню землетрясения, часто обозначаемому как землетрясение безопасного останова. Термин «проектное землетрясение» иногда используется как обозначающий стандартное или унифицированное землетрясение безопасного останова, которое не зависит от площадки.

<sup>6</sup> См. [13], где содержится общее обсуждение эксплуатационных пределов и условий и их связи с безопасностью при проектировании.

<sup>7</sup> В некоторых государствах определенные узлы все еще проектируются со ссылкой на SL-2 и еще более низкий уровень опасности, часто называемый эксплуатационным землетрясением. Однако в настоящем руководстве по безопасности эксплуатационные требования не устанавливаются вместе с требованиями безопасности, поскольку они связаны с различными целями. SL-1 (или эксплуатационное землетрясение) рассматривается в настоящем руководстве по безопасности только в связи с его применением в анализе безопасности и проектировании.

2.7. Независимо от степени сейсмической опасности, при проектировании классифицированных по безопасности узлов для каждой атомной станции в качестве проектных землетрясений следует принимать землетрясения SL-2. Следует обеспечивать, чтобы минимальный уровень соответствовал пиковому ускорению грунта  $0,1g$  (нулевой период спектра отклика конструкции), для рассмотрения в свободном поле. С этим пиковым значением ускорения грунта следует связать единообразный, совместимый с площадкой спектр. В этом случае можно сделать допущение, что SL-1 совпадает с SL-2.

2.8. Проектное землетрясение для любого уровня опасности следует определять с учетом частотного распределения связанных с потенциалом колебаний грунта, их продолжительности и их спектральной плотности мощности. Особую тщательность следует проявлять, когда установлено, что опасность определяется в основном двумя или большим числом источников. В этом случае следует с осторожностью определять огибающую для различных колебаний грунта (или спектров отклика), порожденных различными физическими механизмами (например, механизмами дальнего поля и ближнего поля), связанными с одинаковым уровнем опасности. Вследствие потенциальных различий в требованиях к сейсмостойкости КСЭ, вероятно, целесообразно выполнить отдельную оценку способности для различных колебаний грунта.

2.9. Вводимые сейсмические данные о колебаниях грунта обычно определяются в свободном поле, на поверхности земли или на коренной породе [2]. Вводимые сейсмические данные могут быть определены в терминах спектрального ускорения, скорости или смещения как функции частоты колебаний грунта.

2.10. Когда вводимые сейсмические данные требуются для уровня фундамента, для их оценки может потребоваться процесс развертывания-свертывания данных, как поясняется в [3].

## КАТЕГОРИЗАЦИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ, СИСТЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ

2.11. Любые серьезные последствия, ожидаемые на площадке в результате землетрясения, связаны с колебаниями, индуцируемыми в КСЭ через конструкции станции. Колебания могут воздействовать на функции безопасности станции непосредственно или посредством косвенных механизмов взаимодействия, таких, как механическое взаимодействие между

узлами, выброс вредных веществ, пожар или затопление, вызванные землетрясением, ухудшение доступа оператора и недоступность путей эвакуации или доступа.

2.12. Любые возникающие сейсмические нагрузки воздействуют на все узлы, и функционирование, требуемое в случае землетрясения, не обязательно связано со стандартной рассматриваемой в классификации безопасности функцией безопасности ([1], пункты 5.1 и 5.2), которая основана на наиболее строгой из всех функций безопасности, требуемых всеми условиями проектных основ (постулируемыми исходными событиями). Поэтому при подходе к проектированию, ориентированном на обеспечение безопасности, в дополнение к классификации безопасности, КСЭ могут быть сгруппированы в четыре или более категории с точки зрения их важности для безопасности во время землетрясения и после него.

2.13. В том случае, когда существует категоризация внешних событий, как определено в [4], следует обеспечивать, чтобы предлагаемая здесь категоризация сейсмостойкости<sup>8</sup> соответствовала ей. Однако категоризацию сейсмостойкости следует также определять в отсутствие общей классификации внешних событий ввиду специфичности проектирования сейсмостойких конструкций, и поэтому здесь приводится новое определение категоризации сейсмостойкости. Могут быть приняты и другие методы классификации при условии, что они удовлетворяют определенным ниже критериям приемлемости.

2.14. Для атомных станций следует устанавливать категорию сейсмостойкости 1. Относящиеся к этой категории узлы следует проектировать таким образом, чтобы они выдерживали последствия колебаний грунта, связанных с землетрясениями уровня SL-2. Категория сейсмостойкости 1 обычно совпадает с наивысшими категориями, определенными для безопасности, и охватывает все узлы, важные для безопасности. В частности, следует предусматривать, чтобы к категории сейсмостойкости 1 относились следующие узлы, а также все их опорные конструкции:

---

<sup>8</sup> Категоризация сейсмостойкости – это процесс, в ходе которого узел станции относится к определенной категории сейсмостойкости в соответствии с требованиями к его функционированию во время землетрясения и после него, помимо других классификаций, таких, как связанные с безопасностью, обеспечением качества и техническим обслуживанием. Соответствующий критерий приемлемости, связанный с этим узлом, является частью категоризации.

- (a) узлы, отказ которых может прямо или косвенно привести к аварийным состояниям вследствие землетрясения уровня SL-2;
- (b) узлы, необходимые для останова реактора, поддержания реактора в состоянии останова, отвода остаточного тепла в течение требуемого периода и мониторинга параметров, важных для выполнения этих функций;
- (c) узлы, необходимые для предотвращения или смягчения последствий недопустимых выбросов радиоактивных веществ (пределы для которых следует устанавливать регулирующему органу) в случае любых постулируемых исходных событий, учитываемых при проектировании, независимо от вероятности их возникновения.

2.15. Выбор узлов в соответствии с приведенным выше пунктом (c) связан с подходом глубокоэшелонированной защиты: в случае землетрясения уровня SL-2 необходимо, чтобы всегда имелись все уровни защиты ([1], пункт. 4.4)<sup>9</sup>. Следует обеспечивать, чтобы физические барьеры, предназначенные для защиты станции от внешних событий, отличных от сейсмических событий, сохраняли во время землетрясения целостность и свои функциональные возможности.

2.16. Узлы атомной электростанции, относящиеся к категории сейсмостойкости 1, следует проектировать, монтировать и обслуживать в соответствии с наиболее строгой национальной практикой для ядерных применений: следует обеспечивать, чтобы запас безопасности<sup>10</sup> был выше, чем запас безопасности на установках, подвергающихся традиционному риску. Для любого относящегося к категории сейсмостойкости I узла следует в соответствии с требующейся функцией безопасности задавать соответствующий критерий приемлемости<sup>11</sup> (такой, как значение проектного

---

<sup>9</sup> В рамках подхода глубокоэшелонированной защиты, защита от всех внешних событий является частью уровня 1 глубокоэшелонированной защиты.

<sup>10</sup> В данном контексте запас безопасности является результатом особо оговоренных условий при проектировании, выборе материалов, строительстве, техническом обслуживании и обеспечении качества.

<sup>11</sup> Критерии приемлемости представляют собой заданные границы значения функционального показателя или показателя состояния, используемого для оценки способности конструкции, системы или элемента выполнять проектную функцию. Используемые здесь критерии приемлемости означают заданные границы значения функционального показателя или показателя состояния для конструкции, системы или элемента при заданном постулируемом исходном событии (например, показателя, связанного с работоспособностью, герметичностью или автономностью).

параметра, указывающее работоспособность, герметичность или максимальную деформацию). Однако в некоторых случаях критерии приемлемости физических барьеров могут быть снижены для сочетаний нагрузок, включающих землетрясение уровня SL-2 ([1], пункт 5.7), при условии детальной оценки воздействий на функции безопасности станции.

2.17. Для атомных станций следует устанавливать категорию сейсмостойкости 2. Из всех узлов станции, включая те из них, которые не являются узлами, важными для безопасности [1], к категории сейсмостойкости 2 относятся:

- 1) узлы с возможным пространственным взаимодействием (например, при разрушении, падении или смещении) или любыми другими видами взаимодействия (например, взаимодействиями, вызываемыми выбросами опасных веществ, пожаром или затоплением, или землетрясением) с узлами категорий сейсмостойкости 1 и 3. Следует подтверждать, что потенциальные эффекты и ущерб, причиняемый узлам категории сейсмостойкости 2, не повлияют ни на связанные с безопасностью функции любого из узлов категорий сейсмостойкости 1 и 3 (пункт 2.20), ни на любое связанное с безопасностью действие оператора;
- 2) узлы, не относящиеся к категории сейсмостойкости 1 (в частности, узлы согласно подпунктам (b) и (c) пункта 2.14), которые необходимы для предотвращения или смягчения последствий аварийных условий на станции (вызываемых иными, помимо землетрясений, постулируемыми исходными событиями) в течение настолько длительного периода, что существует разумная вероятность того, что в течение этого периода может произойти землетрясение SL-2;
- 3) узлы, имеющие отношение к доступности площадки и узлов, необходимых для осуществления плана аварийной эвакуации.

2.18. В частности, в тех случаях, когда в результате землетрясения ожидается, на основе анализа, испытаний или опыта, возникновение любого взаимодействия, и это может поставить под угрозу функционирование узлов категорий сейсмостойкости 1 или 3 (в том числе действия оператора), следует принять одну из следующих мер:

- (a) такой относящийся к категории сейсмостойкости 2 узел следует перевести в категорию сейсмостойкости 1 или 3 и проектировать соответствующим образом;

- (b) такие относящиеся к категории сейсмостойкости 2 узлы следует аттестовать с учетом SL-2, с тем чтобы они оказывали неблагоприятного воздействия на узлы, относящиеся к категории сейсмостойкости 1 или 3;
- (c) следует обеспечивать надлежащую защиту подвергающихся опасности узлов категории сейсмостойкости 1 или 3, с тем чтобы их функционирование не ставилось под угрозу вследствие взаимодействия с узлами категории сейсмостойкости 2.

2.19. Проектирование, монтаж и техническое обслуживание узлов категории сейсмостойкости 2 следует выполнять в соответствии с практикой, установленной для ядерных применений. Однако в гипотезе пункта 2.18 (b) (взаимодействующие узлы), для случаев, когда вероятность взаимодействия с узлами категории сейсмостойкости 1 или 3 считается весьма низкой, могут применяться более низкие внутренне присущие запасы безопасности, чем те, которые определены в ядерных нормах.

2.20. Для атомных станций следует устанавливать категорию сейсмостойкости 3. К категории сейсмостойкости 3 следует относить все узлы, которые могут создавать радиологическую опасность, но которые не связаны с реактором (например, здание хранилища отработавшего топлива и здание хранилища радиоактивных отходов). В некоторых государствах требуется, чтобы запасы безопасности этих узлов соответствовали связанным с ними возможным радиологическим последствиям, которые, как ожидается, отличаются от потенциальных последствий, связанных с реактором, поскольку они в целом связаны с иными механизмами выбросов (например, утечка из отходов, отказ контейнеров с отработавшим топливом).

2.21. Для атомных станций следует устанавливать категорию сейсмостойкости 4. К категории сейсмостойкости 4 следует относить все узлы, которые не относятся к категории сейсмостойкости 1 или категории сейсмостойкости 2 или 3.

2.22. Узлы атомной электростанции, относящиеся к категории сейсмостойкости 4, следует проектировать как минимум в соответствии с национальной практикой, установленной для неядерных применений, и, следовательно, для установок, подвергающихся традиционному риску. Для некоторых узлов этой категории сейсмостойкости, важных для эксплуатации станции, может оказаться разумным выбрать более строгие критерии приемлемости, основанные только на целевых эксплуатационных параметрах. Такой подход сводит к минимуму необходимость останова, инспекций и

повторного лицензирования станции, позволяя тем самым продолжить ее эксплуатацию.

2.23. Включение узла в категорию сейсмостойкости следует базировать на четком понимании функциональных требований, которые следует выполнять для обеспечения безопасности во время землетрясения или после него. Части одной и той же системы могут, в соответствии с их различными функциями, принадлежать к различным категориям. Примерами подлежащих учету аспектов являются герметичность, степень повреждения (например, усталость, износ), механические или электрические функциональные возможности, максимальное смещение, степень остаточной деформации и сохранение геометрических размеров.

2.24. Сейсмические нагрузки следует учитывать для всех возможных эксплуатационных режимов станции. При проектировании сейсмостойких конструкций следует принимать во внимание категории, к которым относятся проектируемые узлы.

2.25. Категории сейсмостойкости зависят от типа реактора (например, корпусной водо-водяной реактор и реактор с кипящей водой), правил и норм регулирующего органа соответствующего государства и от характерных для конкретной площадки граничных условий (например, наличия ресурсов охлаждающей воды).

2.26. В рамках процесса проектирования следует подготовить детальный перечень всех узлов и связанных с ними критериев приемлемости. Образцы перечней приводятся в Дополнении.

## СОЧЕТАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК С НАГРУЗКАМИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

2.27. Проектные нагрузки могут быть подразделены на следующие группы:

- L1: нагрузки при нормальной эксплуатации;
- L2: дополнительные нагрузки, связанные с ожидаемыми при эксплуатации событиями;
- L3: дополнительные нагрузки в аварийных условиях.

2.28. Расчет сейсмических нагрузок следует производить применительно к конкретному месту размещения рассматриваемого узла с учетом характеристик

грунта и станции, включая массу и жесткость и распределение оборудования на станции. Следует обеспечивать учет граничных сочетаний нагрузок.

2.29. Для целей проектирования сейсмостойких конструкций следует объединять нагрузки, возникающие вследствие землетрясений, с нагрузками, создаваемыми технологическими процессами на станции, следующим образом (таблица I):

ТАБЛИЦА I. СОЧЕТАНИЯ НАГРУЗОК, ВКЛЮЧАЮЩИЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

| Категория сейсмостойкости | L1 | L2 | L3 | SL-2 <sup>a</sup> | Запас безопасности                                                                                                                             |
|---------------------------|----|----|----|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                         | x  |    |    | x                 | Согласно сводам положений по проектированию для установок повышенного риска (ядерным сводам положений).                                        |
| b                         | x  | x  |    | x                 | Такой же, как указано выше.                                                                                                                    |
| b                         | x  |    | x  | x                 | Такой же, как указано выше.                                                                                                                    |
| 2                         | x  |    |    | x                 | Согласно сводам положений по проектированию для установок повышенного риска (ядерным сводам положений) или пониженного риска <sup>c</sup> .    |
| b                         | x  | x  |    | x                 | Такой же, как указано выше.                                                                                                                    |
| b                         | x  |    | x  | x                 | Такой же, как указано выше.                                                                                                                    |
| 3                         | x  |    |    | x                 | Согласно сводам положений по проектированию для установок с рисками, отличающимися от рисков на атомных электростанциях (обычно более низкими) |
| b                         | x  | x  |    | x                 | Такой же, как указано выше.                                                                                                                    |
| b                         | x  |    | x  | x                 | Такой же, как указано выше.                                                                                                                    |
| 4                         | x  |    |    | x                 | Согласно сводам положений по проектированию для установок с обычными рисками                                                                   |

<sup>a</sup> SL-1 может использоваться в некоторых сочетаниях нагрузок, отличных от сочетаний с SL-2, если это подкрепляется вероятностными аргументами.

<sup>b</sup> Рассматривается только в том случае, если существует либо причинная зависимость от SL-2, либо высокая вероятность совпадения.

<sup>c</sup> В том случае, если может быть подтверждена низкая вероятность взаимодействия, могут быть рассмотрены более низкие запасы безопасности.



- (a) для узлов категорий сейсмостойкости 1 и 3 нагрузки L1 следует объединять с нагрузками проектного землетрясения в соответствии с их категориями;
- (b) для узлов категорий сейсмостойкости 1 и 3 нагрузки L1 и L2 или нагрузки L3 следует объединять с нагрузками проектного землетрясения, если нагрузки L2 или L3 являются результатом землетрясения и/или имеют высокую вероятность совпадения с сейсмическими нагрузками (как может иметь место в случае, например, нагрузок L2, которые возникают достаточно часто, независимо от землетрясения<sup>12</sup>).
- (c) для узлов категории сейсмостойкости 2, которые, как было установлено, взаимодействуют с узлами категорий сейсмостойкости 1 и 3, следует применять те же сочетания, что и для категорий сейсмостойкости 1 или 3, возможно, с использованием различных запасов безопасности;
- (d) для узлов категории сейсмостойкости 4 в случае соответствующих проектных нагрузок следует применять сочетания нагрузок согласно национальной практике.

2.30. При проектировании сейсмостойких КСЭ следует принимать во внимание внешние события, такие, как наводнения или пожары, которые могут возникать на площадке вследствие землетрясения. Их следует определять на основе вероятностных соображений. Эти нагрузки, возникающие как следствие землетрясения, следует объединять либо с нагрузками SL-1, либо с нагрузками SL-2, с надлежащим учетом распределения во времени и продолжительности событий.

## СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ

2.31. Следует обеспечивать, чтобы критерии приемлемости для сочетаний нагрузок, включая эффекты сочетания SL-2 с нагрузками L1 или L2, или нагрузками L3, были такими же, как критерии, принятые в соответствующей практической деятельности для нагрузок L3, воздействующих без землетрясения.

2.32. Конструкции категорий сейсмостойкости 1 и 3 могут проектироваться с учетом возможности нелинейного поведения (путем выбора материала и/или

---

<sup>12</sup> Типичными нагрузками L2, вызванными сейсмическим явлением, могут быть нагрузки, создаваемые в результате аварийного останова реактора или пика давления в первом контуре вследствие аварийного останова турбины кипящего реактора при ограниченной возможности сброса пара в конденсатор.

геометрии) при условии, что их критерии приемлемости (выраженные в виде значения такого проектного параметра, как упругость, максимальное раскрытие трещин, отсутствие продольного изгиба или максимальная пластичность) удовлетворяются с запасом безопасности, соответствующим категории сейсмостойкости. Следует обеспечивать, чтобы частота случаев необратимого поведения конструкций (например, в отношении ограниченной пластичности соединений) была совместима с ожидаемой частотой возникновения соответствующих сейсмических сценариев. В любом случае конкретные критерии приемлемости (например, герметичность, максимальное относительное смещение и функциональные возможности) следует четко оценивать согласно категории сейсмостойкости<sup>13</sup>.

2.33. При проектировании сооружений категории сейсмостойкости 2 может также предусматриваться возможность нелинейного поведения. Следует предусматривать, чтобы детальная конструкция строительных элементов, особенно соединений и сочленений, обеспечивала уровень пластичности, требуемый критериями приемлемости.

2.34. Свойства материалов следует выбирать согласно характеристическим значениям в сочетании с применением соответствующих процедур обеспечения качества. Следует выполнить соответствующую оценку эффектов старения, с тем чтобы гарантировать долгосрочную безопасную работу материалов и КСЭ ([1], пункт 5.47).

2.35. Следует выполнять конкретные оценки ускорения действия механизмов ухудшения свойств в результате влияния сейсмических явлений. Если с такими механизмами связано снижение сейсмостойкости на протяжении срока службы станции, следует увеличить запасы безопасности, с тем чтобы гарантировать при проектировании требуемый уровень безопасности после любого сейсмического явления.

2.36. С целью обеспечения надлежащей сейсмической безопасности проектирование следует производить с учетом эффектов пластичности и следует предусматривать режимы постепенных и поддающихся обнаружению

---

<sup>13</sup> В большинстве государств понижены некоторые критерии приемлемости для определенных герметичных сооружений (например, защитной оболочки и бассейна для топлива) в случае экстремального землетрясения. В этом случае целостность требуется только в случае экстремального землетрясения, но восстановление эксплуатации впоследствии зависит от структурной оценки воздействия землетрясения на герметичность таких сооружений.

отказов. Ниже приведены в качестве образца меры, показывающие, что следует учитывать на стадии проектирования:

- в железобетонных сооружениях следует предотвращать хрупкое разрушение при воздействии сдвиговых нагрузок и/или в соединениях или в зонах сжатия бетона;
- для того, чтобы предел прочности строительных элементов задавался арматурой, следует определять соответствующую минимальную прочность на сжатие бетона;
- для обеспечения минимальной пластичности арматуры следует определять соответствующее минимальное отношение предела прочности при растяжении к пределу податливости при растяжении;
- сочленения конструкций, особенно в железобетонных сооружениях, следует проектировать таким образом, чтобы обеспечивалась высокая пластичность и способность выдерживать большие линейные и угловые деформации; следует обеспечивать соответствие этих мер критериям приемлемости, определенным в категоризации сейсмостойкости, но при этом следует также принимать во внимание соображения, связанные с запроектными явлениями;
- по крайней мере для главных контуров теплоносителя следует показывать, что любой 'разумный' дефект, который может оказаться невозможно обнаружить с помощью инспекций, не будет распространяться в течение жизненного цикла станции и также останется стабильным в течение землетрясения;
- следует надлежащим образом учитывать эффекты старения, с тем чтобы обеспечить основу для предположения о 'долгосрочных' геометрических конфигурациях (например, против ползучести и оседания) и пластических свойствах материалов (например, против радиационного охрупчивания).

2.37. Особый случай представляет собой применение концепции утечки перед разрывом<sup>14</sup>: в случаях применения этого критерия следует производить, посредством анализа или испытаний и с использованием процедур, обеспечивающих требуемую точность, конкретную оценку вклада сейсмических нагрузок в распространение трещин.

2.38. Следует обеспечивать, чтобы критерии приемлемости для категории сейсмостойкости 4 соответствовали по крайней мере применяемым национальным нормам и сводам положений для установок, подверженных традиционным рискам.

## СООБРАЖЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ЗАПРОЕКТНЫМИ СОБЫТИЯМИ

2.39. Проектирование сейсмостойких конструкций следует производить в соответствии с общими рекомендациями, кратко изложенными в предыдущих пунктах, и рекомендациями по проектированию, изложенными в разделе 3, с тем чтобы обеспечить запасы на случай сейсмических событий, выходящих за рамки основы проекта, и предотвратить превращение потенциально незначительных отклонений параметров станции в серьезное аномальное поведение станции («пороговый» эффект)<sup>15</sup>. В целом нет необходимости количественно определять эти запасы.

2.40. Для конкретных узлов, для которых вследствие весьма нелинейного поведения (например, поведения, вызванного односторонними ограничителями, установленными с целью выполнения других критериев проектирования, таких, как критерии, связанные с тепловыми нагрузками) не могут быть соблюдены общие принципы проектирования сейсмостойких конструкций, следует проводить исследования чувствительности и принимать соответствующие меры по укреплению с целью увеличения запасов безопасности.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ОБОСНОВАНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ

2.41. В отчете по обоснованию безопасности (ООб) следует излагать определение основы проекта, общие допущения при проектировании,

---

<sup>14</sup> Концепция утечки перед разрывом представляет собой общий используемый в некоторых государствах подход в областях проектирования, выбора материалов, строительства, обеспечения качества, мониторинга и инспектирования. Он оказывает серьезное влияние на некоторые проектные параметры, такие, как нагрузки в переходных режимах, учитываемые при проектировании топливных сборок, нагрузки в переходных режимах, учитываемые при проектировании границы давления теплоносителя (отпадает необходимость учета двойного гильотинного разрыва трубопровода), и сценарий нагрузок, создаваемых биениями трубопроводов при разрыве трубы. Однако данный подход разработан во многих различных вариантах в разных государствах (в том числе для различных областей применения: начиная с трубопроводов только первого контура и заканчивая всеми связанными с безопасностью трубопроводами), и его общее обсуждение в настоящем руководстве по безопасности не представляется возможным.

<sup>15</sup> Пороговый эффект – это эффект резкого перехода из одного состояния в другое: разрыв первой производной ответа при незначительном отклонении параметра станции.

окончательную оценку запаса безопасности и логику сейсмического мониторинга. Технические отчеты следует снабжать ссылками и делать доступными с целью обеспечения единообразия процедур анализа и испытаний, применяемых при сейсмической аттестации. Рекомендации и руководящие материалы по содержанию ООБ приведены в [14].

### **3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

#### **ВЫБОР СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ КОМПОНОВКИ СТАНЦИИ**

3.1. На ранних стадиях проектирования станции следует разработать предварительную схему расположения ее главных установок; эту схему следует периодически пересматривать с целью выработки наиболее подходящего решения для проектирования сейсмостойких конструкций. Следует обеспечивать, чтобы все процедуры проектирования сейсмостойких конструкций были твердо основаны на четком понимании последствий прошлых разрушительных землетрясений, и эти знания следует осваивать и реалистично применять. При выполнении подготовительных работ следует принимать во внимание соображения, упомянутые в настоящем разделе, с тем чтобы снизить воздействие землетрясений на КСЭ.

3.2. На предварительных стадиях проектирования, сейсмические эффекты (усилия и нежелательные эффекты кручения или качания) следует сводить к минимуму посредством соответствующего выбора структурной компоновки с применением некоторых общих критериев, таких как:

- (a) расположение центра тяжести всех сооружений на практически достижимом низком уровне;
- (b) выбор настолько простых и правильных решений для плана и фасада строений, насколько это практически осуществимо, а также недопущение различных уровней заглубления;
- (c) исключение выступающих частей (асимметрии), насколько это практически осуществимо;
- (d) расположение центра жесткости на различных высотных отметках настолько близко к центру масс, насколько это практически осуществимо;

- (е) исключение, насколько это практически осуществимо, жестких соединений между сооружениями или оборудованием различных категорий и различного динамического поведения.

3.3. Для уменьшения нежелательных неравномерных перемещений отдельных конструкций следует продумать возможность размещения сооружений, насколько это практически осуществимо, на общем фундаменте, или, по меньшей мере, следует избегать различных уровней заглубления. При выборе площадки станции следует избегать значительных различий в свойствах грунта под фундаментом. Следует обеспечивать, чтобы все отдельные опоры или свайные основания были связаны в пределах плана несущего перекрытия.

3.4. Следует предусматривать стандартные компоновки и простые соединения между конструкциями, с тем чтобы облегчить проведение расчета на сейсмостойкость и повысить сейсмостойкость трубопроводов и оборудования, примыкающих к строениям. При пересечении границ конструкций (например, с температурными или рабочими швами), при выполнении соединений между строениями или при подведении коммуникаций к зданию в подземных каналах следует предпринимать меры предосторожности, с тем чтобы исключить возможность повреждения или отказа из-за неравномерных перемещений.

3.5. Может также применяться специальный подход ко всему проекту или к его частям, заключающийся в использовании антисейсмических систем и устройств, таких, как изоляторы оснований. Этот метод следует объединять со специальными проектными мерами, предусматривающими более сложную систему фундамента и специальные эксплуатационные процедуры для периодического контроля и технического обслуживания изолирующих устройств; эти дополнительные усилия могут быть в значительной мере скомпенсированы значительным снижением требований к сейсмостойкости КСЭ. Зона повышенных относительных перемещений может привести к возникновению проблем при проектировании сопряжений и соединений конструкций, и эти вопросы следует четко рассматривать при проектировании. Кроме того, следует производить оценку влияния использования сейсмических изоляторов на реакцию на другие нагрузки в тех случаях, когда эта реакция может ухудшиться.

## ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

3.6. Информацию о характерных для конкретной площадки свойствах грунта следует получать посредством кампаний по исследованию площадки,

лабораторных анализов и синтеза инженерно-технических данных, как описано в [3], где также приведены руководящие материалы относительно расширения этих кампаний и соответствующих требований. Следует обеспечивать, чтобы точность данных соответствовала общей надежности, требуемой в процессе проектирования. Процедуры моделирования грунта обсуждаются в разделе 5.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

3.7. При проектировании и рассмотрении проектов сооружений особое внимание следует уделять следующим вопросам:

- (a) адекватности грунтового основания [3];
- (b) пригодности типов фундаментных опор или различных типов фундаментов под связанными друг с другом сооружениями (например, следует исключать решения, в которых часть фундамента одного здания опирается на сваи или скальную породу, а другая часть укладывается непосредственно на грунт);
- (c) сбалансированному и симметричному размещению несущих рамных конструкций и стен жесткости для достижения оптимального распределения жесткости, нагрузок и массы при минимальных крутящих усилиях;
- (d) необходимости предотвращения соударения соседних строений (раскачивания) вследствие их динамических деформаций (это явление может также возникать в случае конструкций с нежесткими соединениями);
- (e) адекватности соединений вспомогательных строений и служебных пристроек с основным сооружением (см. также пункт (d));
- (f) необходимости обеспечения достаточной прочности основных элементов конструкции, особенно по отношению к действию поперечных сдвигающих сил;
- (g) необходимости обеспечения достаточной пластичности и предотвращения хрупкого разрушения от сдвига или при сжатии; например, путем обеспечения надлежащего количества стальной арматуры, в частности, достаточного количества арматурных хомутов для колонн (т.е. адекватного удержания) с целью предотвращения преждевременного продольного изгиба работающих на сжатие балок, расположенных в зонах пластических деформаций;
- (h) соответствующему расположению и распределению арматурных стержней: слишком высокая концентрация стержней может привести к растрескиванию бетона вдоль стержней;

- (i) необходимости расчета соединений различных элементов конструкции и анкеровки элементов в бетоне с целью обеспечения пластичности при разрушении (например, длина зоны анкеровки должна быть достаточной для того, чтобы исключить их выдергивание, и следует обеспечивать достаточное количество поперечной арматуры) и, когда это практически осуществимо, исполнению соединений между элементами настолько же прочными и пластичными, как и элементы, которые они соединяют;
- (j) оценке нелинейных изгибающих моментов, возникающих под действием вертикальных сил, и возникновению в случае землетрясения горизонтальных сил (так называемого эффекта 'P-Δ');
- (k) дополнительному воздействию выталкивающей силы подземных вод на фундамент;
- (l) возможности бокового скольжения конструкций на гидроизоляции (особенно если она влажная) во время землетрясения;
- (m) динамическому воздействию на конструктивные элементы 'ненесущих' элементов, таких, как разделительные перегородки;
- (n) детальному расчету рабочих швов и температурных напряжений в крупных, цельных, монолитных конструкциях, стойких к воздействию колебаний неодинаковой силы при землетрясениях;
- (o) эффектам передачи усилий в случаях, когда жесткость защитной оболочки реактора превышает жесткость окружающих бетонных конструкций и они соединены между собой или могут взаимодействовать таким образом, что сейсмические нагрузки, воздействующие на бетонные конструкции, могут передаваться защитной оболочке реактора. Вследствие сложности взаимодействий таких конструкций трудно оценить такие силы, и следует, насколько возможно, проектировать подобные конструкции без сопряжений на уровне выше фундамента;
- (p) надлежащему анкерному креплению механических элементов к строительным конструкциям;
- (q) необходимости укрепления ненесущих стен или стальных конструкций с целью предотвращения падения их или их частей на узлы, связанные с безопасностью.

## ЗЕМЛЯНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

3.8. На площадках атомных станций могут находиться следующие связанные с безопасностью земляные сооружения:

— конечные поглотители тепла: плотины, дамбы и насыпи;



- сооружения для защиты площадки: плотины, дамбы, волноломы, волноотбойные стенки, укрепительные покрытия;
- контур площадки: подпорные стенки, естественные откосы, выемки и насыпи.

3.9. Эти земляные сооружения следует проектировать в соответствии с их сейсмической категоризацией, обеспечивая надлежащую сейсмостойкость и учитывая следующие связанные с землетрясениями эффекты:

- 1) откосные разрушения, вызываемые проектными колебательными движениями грунта, включая ожигение;
- 2) скольжение сооружений на слабых фундаментных материалах или материалах, прочность которых может снижаться в результате ожигения;
- 3) разрушение подземных трубопроводов или утечки через трещины, образовавшиеся вследствие колебаний грунта;
- 4) переливы воды через сооружения вследствие цунами на площадках в береговой зоне или сейшей в водохранилищах, оползней или обвалов горной породы в водохранилища либо повреждения водосбросных или водовыпускных сооружений;
- 5) опрокидывание подпорных стенок.

3.10. Соответствующие процедуры проектирования рассматриваются в [3].

## ТРУБОПРОВОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

3.11. Следует принимать особые меры в отношении проектирования сейсмостойких опорных конструкций для оборудования и трубопроводов:

- (а) при проектировании опор следует тщательно обеспечивать выполнение расчета всех соединений таким образом, чтобы их поведение соответствовало предполагаемым характеристикам, полученным при расчете данной опоры, и они передавали весь диапазон нагрузок, определенных для сопряженных элементов. В частности, если используются ограничители шести степеней свободы, то их следует проектировать, изготавливать и устанавливать таким образом, чтобы свести к минимуму потенциальную опасность того, что какое-либо неожиданное разрушение или трещинообразование в опорном элементе распространится на такие функциональные элементы, как оболочка под давлением или трубопроводы первого контура;

- (b) при проектировании устройств для анкеровки оборудования, например, при использовании анкерных болтов с крюком или концевых болтов, следует тщательно обеспечивать, чтобы все потенциальные силы и моменты были полностью оценены и чтобы анкерные материалы соответствовали своему назначению. Следует обеспечивать, чтобы опорные плиты были достаточно жесткими для того, чтобы исключить эффекты рычага и чтобы анкерные болты были достаточно затянуты для исключения раскачки, пониженных частот, повышенных уровней реакции, превышающих проектные пределы нагрузок, и повышенного риска ослабления, выдергивания или подверженности усталостным нагрузкам. Следует использовать анкеры с повышенным запасом прочности или резервные анкеры с их предварительным нагружением при монтаже, близким к их пределу текучести.

3.12. Для повышения стойкости к индуцированным землетрясениями колебаниям следует принимать во внимание изложенные ниже моменты:

- 1) опорные стойки оборудования следует крепить крестовой связью, если только их размеры не оправдывают отступление от этой рекомендованной практики. Следует избегать резонансов и в некоторых случаях (например, применительно к внутриреакторным устройствам, в которых трудно исключить резонанс посредством модификации конструкции) для предотвращения резонансных эффектов можно модифицировать вибрационные характеристики самой внутренней конструкции здания реактора; Если системы проектируются более жесткими, следует учитывать эффекты теплонапряженности, другие динамические нагрузки и неравномерные движения точек опоры;
- 2) следует избегать настолько, насколько это практически возможно, возникновения резонансов оборудования, такого, как трубопроводы, контрольно-измерительные приборы и внутриреакторные устройства, на частоте преобладающих колебаний опорных конструкций. В некоторых случаях, когда реакцию оборудования, даже если она и является значительной, на практике невозможно уменьшить другими средствами, можно посредством соответствующего изменения конструкции увеличить демпфирование системы.
- 3) для сейсмостойкого крепления трубопроводов и элементов при одновременном обеспечении беспрепятственной температурной деформации следует использовать амортизаторы или ограничители перемещения. Следует избегать чрезмерного использования демпферов ввиду их возможного влияния на эксплуатацию и техническое обслуживание. Для определения расчетных сейсмических исходных

параметров следует использовать реалистические значения коэффициентов демпфирования, так как проектирование с повышенным запасом прочности для сейсмических нагрузок может приводить к уменьшению проектных запасов для тепловых нагрузок (вследствие ограничения свободного смещения);

- 4) Особое внимание следует обращать на возможность соударения соседних элементов между собой или конструктивных элементов с прилегающими частями здания в результате их динамического смещения. Следует также предусматривать гибкость соединений между такими элементами, между элементами и проходками в зданиях и между элементами и подземными подводками к зданиям, а также между зданиями;
- 5) Опоры трубопроводов следует располагать таким образом, чтобы сводились к минимуму нагрузки, передаваемые на оборудование.

3.13. Подобные меры следует также принимать в отношении всех возможных источников колебаний (например, падение летательного аппарата, эксплуатационные колебания и взрывы), поскольку их воздействие может отличаться от воздействия сейсмических колебаний.

## ВЫБОР СООТВЕТСТВУЮЩИХ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3.14. Как показывает опыт многих государств, зачастую в рамках одного и того же проекта для различных областей (механических, строительных конструкций и электрических систем) применяются разные нормы, регламентирующие проектирование, выбор материалов и качество строительства. В рамках различных проектных заданий следует на раннем этапе производить оценку согласованности соответствующих запасов безопасности и связанных с ними уровней неопределенности и их соответствия общим требованиям безопасности для проекта.

3.15. Такая оценка может оказывать реальное воздействие на управление проектом и всю систему обеспечения качества, требуемую для стадии оценки проектирования и строительства, поскольку она обеспечивает реализацию при проектировании проектных допущений в терминах глобальной безопасности станции.

3.16. В частности, при выборе соответствующих норм проектирования следует оценивать совместимость и пригодность следующих вариантов:

- национальных и международных норм проектирования сейсмостойких конструкций, как 'ядерных' (для установок, потенциально создающих повышенный риск для работников, населения и окружающей среды), так и 'неядерных' (для установок, представляющих обычный риск);
- национальных и международных норм проектирования ядерных установок, которые не включают норм проектирования сейсмостойких конструкций;
- национальных норм проектирования, не связанных с ядерными установками и вопросами сейсмостойкости.

При оценке следует проводить сравнение запасов безопасности, методик проектирования и требований по обеспечению качества в течение всего процесса проектирования, от данных о площадке до расчетов материалоемкости. Смешивание норм проектирования не является образцовой практикой, и его следует избегать ввиду внутренне присущей трудности оценки глобального запаса безопасности конструкции.

3.17. Общие запасы безопасности, предусмотренные в проекте, следует затем оценивать на этапе оценки безопасности в соответствии с процедурами, рекомендованными в [9].

## ПЕРИОДИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ

3.18. Как требуется в документе «Безопасность атомных электростанций: эксплуатация» [15] и в соответствии с рекомендациями [16], периодические рассмотрения безопасности станции следует проводить на регулярной основе или всякий раз, когда становится известно о значительной модификации любого проектного допущения. Опыт эксплуатации показывает, что повторная оценка сейсмостойкости как следствие обновления данных о сейсмической опасности была одним из основных вопросов в периодических рассмотрениях безопасности за последние годы. С целью обеспечения надлежащей поддержки периодических рассмотрений безопасности такого рода следует внедрить соответствующее долгосрочное управление конфигурацией и мониторинг (раздел 7).

3.19. При таком рассмотрении следует проводить оценку первоначальных проектных допущений с использованием новых данных оценок на площадке (например, отражающих возникновение новых событий или наличие новых данных о местной тектонике), современных норм проектирования и аттестации и недавно появившихся методов проектирования. Результат будет влиять на

соображения при возобновлении лицензии на эксплуатацию в соответствии с процедурами, обсужденными в [16].

3.20. После завершения периодического рассмотрения безопасности следует обеспечивать постоянную актуальность аттестации сейсмостойкости оборудования. Необходимость поддержания актуальности аттестации сейсмостойкости оборудования следует отражать в процедурах контроля за изменениями на станции, в том числе за изменениями эксплуатационных регламентов станции. В рамках этой структуры, помимо применения обычных норм осуществления административно-технической деятельности, ожидаемых для ядерной установки, следует обеспечивать отсутствие опасностей взаимодействия в зонах, смежных с местами расположения сейсмически аттестованных КСЭ.

## 4. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ АТТЕСТАЦИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

4.1. Аттестация сейсмостойкости узлов, важных для безопасности<sup>16</sup> может проводиться с использованием одного или нескольких следующих подходов:

- анализ;
- испытания;
- опыт, полученный в условиях реальных землетрясений;
- сравнение с уже аттестованными узлами (подобие).

Возможно также использование сочетаний этих методов, как показано на рис. 1.

4.2. Аттестация сейсмостойкости обычно включает аттестацию структурной целостности, а также аттестацию работоспособности или функциональных возможностей. Аттестация сейсмостойкости проводится непосредственно на реальных узлах или их прототипах; или косвенно на модели уменьшенного масштаба, прототипе уменьшенного масштаба или упрощенном варианте узла;

---

<sup>16</sup> Исследования или моделирование грунтов наряду с конструкциями и материалами фундаментов в основном выходит за рамки настоящего руководства по безопасности. Эти вопросы всесторонне рассматриваются в [4].

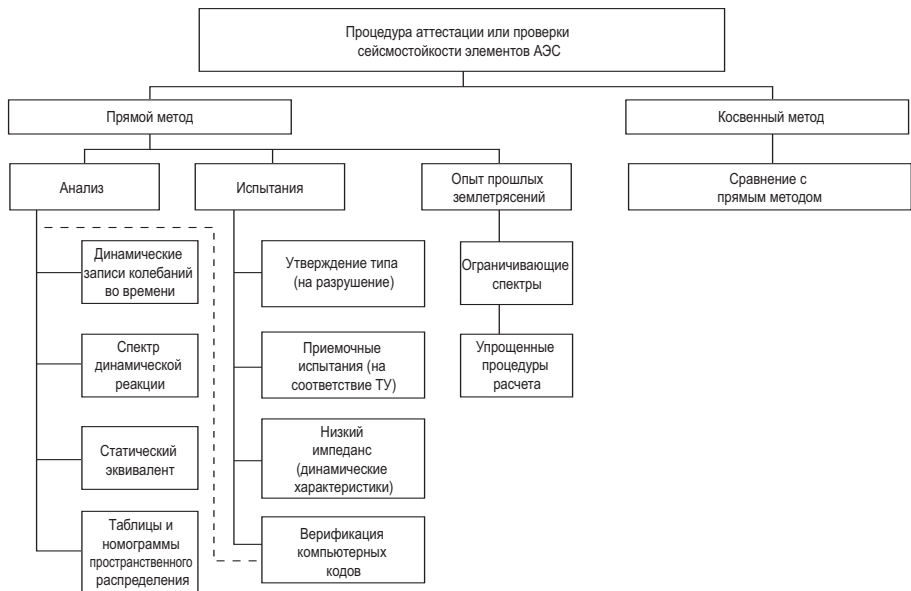


Рис. 1. Перечень методов аттестации или проверки сейсмостойкости.

или методом подобия в случаях, когда такое подобие может быть установлено между кандидатом и эталонным узлом и была проведена прямая аттестация последнего. Какой бы ни был выбран метод, следует обеспечивать, чтобы он точно представлял реальное функционирование элемента или конструкции, когда они подвергаются предписанным воздействиям.

4.3. Следует предпринимать меры для обеспечения того, чтобы для всех аттестуемых узлов применялись согласованные уровни сложности при моделировании.

4.4. Любая аттестационная программа требует правильного или консервативного моделирования граничных условий, применимых для этого узла на станции во время землетрясения, или обеспечения того, что любое отклонение от них не окажет значительного влияния на результат. Наиболее важными из этих условий являются: условия возбуждения, вспомогательные условия, условия окружающей среды и эксплуатационные условия.

4.5. Следует рассмотреть возможность применения в сочетании методов анализа и испытаний, с тем чтобы гарантировать достаточный уровень надежности результатов, особенно при испытаниях на прототипах. В целом:

В случае испытаний:

- следует обеспечивать, чтобы анализ давал информацию о местах нахождения датчиков для испытания;
- следует обеспечивать, чтобы анализ давал информацию, позволяющую определить диапазон и программу испытаний;
- следует обеспечивать, чтобы анализ давал информацию об обработке данных по результатам испытания.

В случае анализа:

- следует обеспечивать, чтобы испытания подтверждали пригодность закона, выбранного для моделирования материалов;
- следует обеспечивать, чтобы испытания подтверждали правильность определения вида отказа;

4.6. Аттестацию сейсмостойкости методом анализа следует использовать для узлов без требования функциональной безопасности, которые являются уникальными и размер или масштабы которых исключают их аттестацию методом испытаний. Аттестация строительных конструкций, резервуаров, распределительных систем и крупных узлов оборудования обычно проводится аналитическими методами после того, как выполнены обсужденные выше требования моделирования.

4.7. Постоянное расширение аналитических возможностей позволило использовать весьма сложные нелинейные основные законы для моделирования материалов в сочетании с точно детализованными числовыми моделями. Это позволило получать подтверждающие результаты с помощью альтернативного программного обеспечения, что укрепляет уверенность в правомерности и правильности результатов. Однако поскольку все аналитические методы имеют пределы применимости, соответствующий этап валидации методов и верификации программного обеспечения следует выполнять с помощью независимого анализа или испытаний.

4.8. Для оборудования следует проводить систематическую оценку возможных видов отказов, связанных с землетрясениями, с учетом критериев приемлемости, определяемых в соответствии с классификацией безопасности. Это следует делать посредством специальных испытаний. Однако по мере совершенствования сложных методов анализа с использованием машинного моделирования появляется возможность прогнозирования с определенной уверенностью посредством анализа функционирования даже 'активного'

оборудования (например, насосов, клапанов и дизель-генераторных установок) в условиях землетрясения. Работоспособность активных элементов может быть аттестована путем анализа только в тех случаях, когда их потенциальные виды отказов могут быть определены и описаны в терминах напряжений, деформаций (включая зазоры) или нагрузок. В противном случае для аттестации активных элементов следует использовать испытания или опыт прошлых землетрясений.

4.9. В целом же следует понимать, что даже при высоком уровне аналитической сложности все-таки требуется ряд допущений и в результате получается в лучшем случае только индикация сейсмического поведения. Для валидации результатов анализа, особенно в том, что касается функциональных возможностей, следует всегда использовать данные испытаний или опыта.

4.10. В дополнение к методам, описанным выше, аттестацию сейсмостойкости узлов категории сейсмостойкости 2 следует проводить с помощью выполняемых специализированным экспертом осмотров, в ходе которых следует оценивать все потенциальные механизмы взаимодействия: механическое взаимодействие или взаимодействие в результате выбросов вредных веществ, пожаров и наводнений (вызванных землетрясением) и воспрепятствование связанным с безопасностью действиям оператора вследствие ухудшения доступа. В этом смысле такие методы осмотра могут рассматриваться в качестве части оценки конструкции; см. [9] в отношении их планирования.

Аттестация сейсмостойкости методом анализа рассматривается в разделе 5. Раздел 6 посвящен трем другим методам.

## 5. АТТЕСТАЦИЯ МЕТОДОМ АНАЛИЗА

### МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

#### Моделирование исходных сейсмических данных

5.1. Динамические исходные колебания, используемые для аттестации узлов, консервативно, но реалистично определяются либо изменениями во времени, либо спектрами реакции. В случае спектров реакции, форму спектра, пиковое



ускорение грунта и длительность колебаний следует задавать согласованно с определением опасности, как обсуждается в [2]<sup>17</sup>.

5.2. Обычно горизонтальную и вертикальную составляющие исходных сейсмических параметров вводят в числовую модель одновременно. В этом случае следует обеспечивать статистическую независимость составляющих. Когда составляющие входных параметров вводятся по отдельности, следует надлежащим образом суммировать соответствующие динамические реакции конструкции, с тем чтобы учесть статистическую независимость двух составляющих исходного параметра.

### **Общие методы моделирования для конструкций и оборудования**

5.3. Для моделирования атомных электростанций могут применяться различные способы, в зависимости от характеристик их конструкции (например, модели с сосредоточенной массой, одномерные модели, осесимметричные модели, двух- или трехмерные модели с конечными элементами). С целью сведения к минимуму вклада используемых методов моделирования в неопределенности результатов следует использовать наиболее подходящий и надежный численный метод. Продолжающийся рост скорости вычислений и прогресс в области графического отображения результатов позволяют использовать значительно более усовершенствованные методы моделирования конструкций и материалов.

5.4. Типичные модели для конструкций и оборудования атомных электростанций показаны на рис. 2 и 3. Эти рисунки демонстрируют широкий диапазон сложности построения различных аналитических моделей. В то время как простые концептуальные модели способны отражать глобальный характер реакции в сложных структурных или механических системах, локальные распределения напряжений или деформаций лучше всего описываются детальными моделями.

5.5. Использование простых моделей с сосредоточенной массой для элементов конструкций или моделей с жесткой массой и пружинными опорами для представления взаимодействий фундамента с конструкцией следует ограничивать случаями проверки точности расчетов, сделанных с использованием более детальных моделей.

---

<sup>17</sup> В некоторых государствах при предварительных или упрощенных расчетах, особенно для менее важных узлов, а также для вертикального направления используется постоянный входной параметр ускорения.

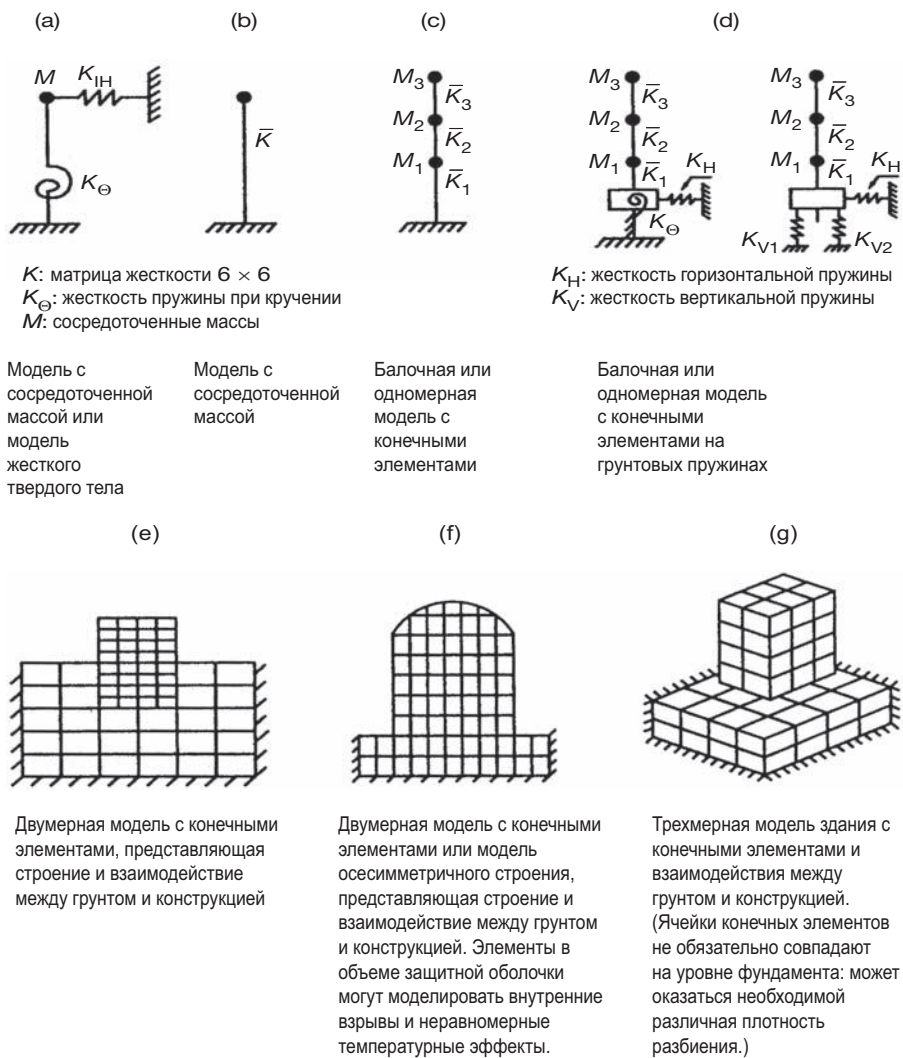


РИС. 2. Примеры различных моделей, связанных с динамическим или статическим анализом.

5.6. Имеются достаточные основания для того, чтобы доверять итогам применения моделей, которые имеют многие тысячи степеней свободы и используют сложные методы моделирования грунта, если эти аналитические средства были проверены путем сравнения с экспериментальными или теоретическими результатами на основе общепринятых методов, используемых экспертами. В связанной с безопасностью документации [12] следует

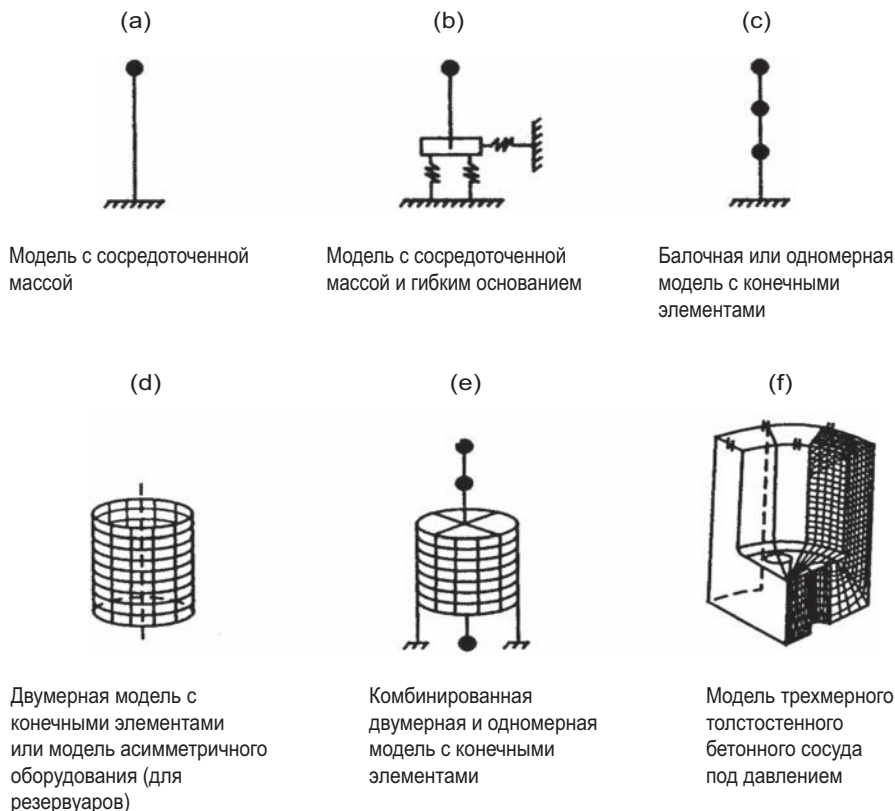


РИС. 3. Примеры различных моделей оборудования, связанных с динамическим или статическим анализом.

приводить данные по валидации используемых компьютерных кодов (т.е. внутренне присущей точности кода) и его верификации (т.е. использованию кода в конкретном применении).

5.7. В аналитические модели следует надлежащим образом включать массовые характеристики структурных систем. Следует предусматривать, чтобы моделируемая масса включала соответствующие вклады рабочих нагрузок (в том числе динамических нагрузок), выбранных в соответствии с вероятностными оценками для их сочетания с нагрузками, создаваемыми землетрясениями, и в соответствии с соображениями при проектировании, касающимися их неблагоприятных эффектов.

5.8. Если реакция некоторых частей конструкции оказывается неопределенной, следует разработать несколько моделей. Следует проводить анализ чувствительности, обеспечивающий основу для принятия такого решения, и это также помогает в выборе размера, типа и числа конечных элементов при использовании данного метода моделирования. Валидацию моделей следует проводить посредством испытаний или путем сравнения с численными моделями с различными параметрами, с тем чтобы устранить возможные неопределенности.

5.9. Выбор надлежащего числа степеней свободы зачастую не представляет трудностей, например, при расчетах для обычного здания с полами. В других случаях, например, для конструкций оболочечного или балочного типа выбор не очевиден и будет зависеть от числа мод, необходимых для сейсмического анализа. Следует обеспечивать, чтобы детали модели соответствовали целям требуемой аттестации и могли представлять соответствующие автономные моды. Практический способ включения в анализ достаточного числа мод (отсутствующей массы) заключается в добавлении моды жесткого твердого тела или моды ускорения с нулевым периодом, что обеспечивает корректировку, учитывающую наиболее высокочастотные моды, которые иным способом не могут быть включены в оценку. Для окончательного подтверждения граничной частоты следует выполнить оценку недостающей массы. Следует также обеспечивать правильность расчета реакций в местах опор, в пределах модели для расчета методом конечных элементов.

### **Критерии разделения**

5.10. Сооружения атомных станций могут быть очень сложными, и единая полная модель, представляющая всю конструкцию, может оказаться слишком громоздкой или неточной. Поэтому при анализе следует задавать структурное разбиение, определив основные системы и подсистемы.

5.11. К основным системам относятся крупные сооружения, которые рассматриваются вместе со средой основания при создании модели взаимодействия грунт-сооружение. Другие КСЭ, соединенные с основными системами, следует относить к подсистемам.

5.12. Для определения необходимости учета какой-либо конкретной подсистемы при анализе основной системы следует пользоваться определенными критериями. В таких критериях разделения следует определять пределы для соотношения относительных масс и отношения частот подсистемы и основной опорной системы; особое внимание следует уделять определению

возможности возникновения резонанса между подсистемой и основной системой.

5.13. Если критерии разделения не соблюдаются, в модель основной системы следует включать приемлемую модель подсистемы. Если все резонансные частоты подсистемы (с учетом гибкости опоры) выше усиленных частот (выше 15 Гц для обычных проектных землетрясений), то в модели основной системы следует учитывать только массу.

5.14. Для детального анализа подсистем сейсмические исходные параметры, включая неравномерное колебание опор или крепления, следует получать путем анализа основной модели. Если связь значительна, то модель подсистемы следует включать в анализ основной системы. Следует обеспечивать, чтобы собственные частоты и модальные массы модели подсистемы в представляющем интерес диапазоне частот были по крайней мере такими же, как соответствующие параметры детальной модели подсистемы.

### **Свойства материалов**

5.15. При моделировании железобетонных сооружений, как правило, принимают допущение об отсутствии свойств профильного трещинообразования. Однако при анализе чувствительности следует также проводить оценку эффектов, связанных со снижением свойств профильного трещинообразования, эквивалентным определенной степени растрескивания.

5.16. Следует надлежащим образом документировать выбор свойств грунта, частот и зависимостей деформации. Методы исследований и методики испытаний обсуждаются в [3]. В данном контексте проектирования следует определять диапазон изменения свойств грунта с целью учета неопределенностей геотехнических параметров, как предлагается в [3]. Последствия такого изменения могут перекрывать изменение структурных свойств (например, в связи с образованием трещин на участке): этот аспект следует четко рассмотреть при оценке безопасности.

5.17. Демпфирование в конструкциях, используемое при анализе для целей аттестации, следует определять консервативно, но реалистично. В этой связи следует с осторожностью оценивать экспериментально определенное демпфирование для материала или структурной системы, так как оно может не отражать реальную работу элемента, установленного на станции.

5.18. Значения демпфирования, используемые при анализе сейсмостойкости, следует задавать в виде средних или медианных значений.

5.19. Значение (геометрическое и связанное с материалом) демпфирования для грунта, которое предполагается использовать при анализе сейсмостойкости, следует получать с помощью консервативной инженерно-технической экспертной оценки. Изменение коэффициентов демпфирования с частотой и амплитудой движения можно учитывать, если это оправдано на основе экспериментальных данных.

5.20. Особую тщательность следует проявлять при численном моделировании для частей модели с различными значениями демпфирования (например, грунта, конструкции и элементов).

### **Взаимодействия с грунтом, текучими средами и другими сооружениями**

5.21. При моделировании зданий или больших наземных резервуаров следует учитывать и детально моделировать взаимодействие грунта и конструкции. С учетом заглубления, уровня подземных вод и локально измененных свойств грунта исходные колебания грунта, определенные для условий на поверхности, следует трансформировать путем обращения свертки в предписанные уровни для комплекса «грунт-конструкция», обычно на уровне фундамента [3]. В этот процесс следует включать исходные вращательные колебания. В том случае, когда получается значительное уменьшение исходного колебания грунта, его следует тщательно обосновать.

5.22. Эффекты взаимодействия грунт-конструкция следует оценивать путем соответствующего моделирования комплекса грунт-конструкция. Ввиду возросшей надежности аналитических процедур, использующих апробированные законы материаловедения, эту задачу можно решить относительно легко даже для весьма детализированных моделей. Однако могут применяться и упрощенные методы, если подтверждается, что они консервативны. Следует тщательно документировать соответствующий диапазон значений применительно к свойствам грунта и способ их моделирования. Особое внимание следует уделять моделированию границ грунта, где следует учитывать эффекты излучения сейсмических волн в неограниченных средах.

5.23. Боковое давление грунта на подземные части сооружений или оснований при колебаниях грунта следует оценивать в соответствии с [3].

5.24. Для стандартного проектного землетрясения, обычно определяемого как колебание грунта SL-2, следует оценивать потенциальную возможность ожигения зернистых водонасыщенных слоев грунта, потенциальную возможность потери несущей способности и потенциальную возможность оседания, и следует подтверждать существование соответствующих запасов безопасности, как поясняется в [3].

5.25. В случае подземных независимых сооружений (например, подземных трубопроводов, каналов и обсадных труб скважин) следует учитывать сейсмические воздействия на них, перечисленные ниже:

- деформации, создаваемые окружающим грунтом во время землетрясения и после него;
- неравномерные смещения или нагрузки на торцевые соединения со зданиями или другими сооружениями;
- воздействие удерживаемых внутри жидкостей (импульсные нагрузки, гидростатическое давление и плескание).

Рекомендации по проектированию сейсмостойких подземных сооружений приводятся в [3].

5.26. Соседние здания или элементы, имеющие общий фундамент, следует включать в единую модель в тех случаях, когда относительное смещение может повлиять на заданный критерий приемлемости (такой, как значение проектного параметра, указывающее упругость, максимальное раскрытие трещин, отсутствие продольного изгиба или максимальную пластичность).

5.27. Учитывая необходимость обеспечения соответствующего запаса безопасности, следует проверять наличие в конструктивных швах между смежными конструктивными элементами или между смежными зданиями достаточных зазоров, обеспечивающих гашение толчков и ударов.

5.28. При моделировании конструкций следует учитывать наличие подсистем, которые могут обладать инерционными свойствами, обусловленными содержащимися в резервуарах и бассейнах жидкостями. В частности, следует оценивать и тщательно учитывать вертикальное движение, связанное с режимом вентиляции вертикальных гибких баков.

5.29. Кроме того, плескание жидкости может приводить к значительным импульсным нагрузкам и динамическим нагрузкам, действующим вверх и вниз, а также к циклическим нагрузкам на сооружения или их части. В частности,

такие импульсные нагрузки могут приводить к разрушению крыш баков и креплений к стенам резервуаров и бассейнов на пути их распространения. Импульсные нагрузки, при их обнаружении, следует моделировать с помощью специализированных процедур.

5.30. В соответствующих случаях следует рассмотреть возможность создания упрощенных моделей на основе комбинаций эквивалентных масс и пружин с целью обеспечения надлежащего учета реакций на плескание в требуемом диапазоне частот.

5.31. Коэффициент демпфирования для моды плескания следует задавать весьма низким<sup>18</sup>, поскольку демпфирование, связанное с импульсной модой вибраций, обычно определяется материалом контейнера, соединениями и используемыми анкерными креплениями. Однако если ожидается, что вертикальная составляющая ускорения на свободной водной поверхности будет превышать  $1,0g$ , на свободной водной поверхности могут образоваться дополнительные волны. В таких случаях следует рассмотреть возникновение в реакции нелинейных эффектов демпфирования.

#### **Общие методы моделирования для механических и электрических элементов**

5.32. Механические и электрические элементы, кроме узлов первого контура, обычно представляются в анализе одиночной массой или системой из нескольких масс, прикрепленной к поддерживающему ее строению. Их динамической связью с основным зданием можно обычно пренебрегать при условии, что соблюдены общие критерии разделения, обсужденные выше.

5.33. Моделирование оборудования обычно подразделяется на несколько категорий, как показано на рис. 3. Для элементов, не моделируемых вместе с опорной конструкцией, исходными данными для анализа является реакция перекрытия, выраженная либо через расчетные поэтажные записи колебаний во времени<sup>19</sup>, либо через расчетные спектры реакции<sup>20</sup>.

---

<sup>18</sup> Коэффициент демпфирования для моды плескания следует обычно принимать равным 0,5% или менее.

<sup>19</sup> Расчетные поэтажные записи колебаний во времени - это записи движения перекрытий во времени для рассматриваемой конструкции, полученные с помощью данных проектных колебаний грунта, с учетом изменчивости и неопределенности исходных колебаний грунта и характеристик здания и фундамента.

<sup>20</sup> В некоторых государствах для вертикального направления в качестве исходных данных используются эквивалентные статические нагрузки.



5.34. Количество изоляции, размер, местонахождение и число зазоров между опорами, тип соединения (например, фланцевое), частота реакции и использование упругопластических или энергопоглощающих опорных устройств – все это может оказывать на демпфирование влияние, которое следует учитывать при проектировании элементов. Этот эффект следует тщательно проверять и надлежащим образом моделировать.

5.35. В случае корпусов и резервуаров, содержащих жидкости, следует учитывать эффекты плескания и импульсных нагрузок, включая частотные эффекты. Следует также принимать во внимание влияние колебаний жидкости или изменений давления на подводные конструкции. Эти воздействия могут быть связаны с гидродинамическими нагрузками, создаваемыми жидкостью, и со снижением функциональных возможностей (например, с потерей эффективности защитных свойств бассейнов хранения топлива или с созданием помех в приборных сигналах).

### **Общие методы моделирования для распределительных систем**

5.36. Реакция распределительных систем (трубопроводов, кабельных желобов и кабелепроводов) на возбуждение во время землетрясения весьма нелинейной. Вычисления напряжений и реакций опор посредством расчета, основанного на линейно-упругой зависимости, позволяют получить приблизительные сведения о напряжениях и действующих на опоры нагрузках, которые подходят для сравнения с допустимыми критериями поведения в целях определения соответствия конструктивным требованиям, но такие вычисления не следует применять для получения точных значений истинных напряжений и реакций опор. Номинально закрепленные опоры распределительных систем с некоторым предельным прогибом могут для целей моделирования считаться жесткими.

5.37. В модели следует учитывать гибкость или жесткость элементов систем трубопроводов, таких, как коленчатые патрубки, тройники и насадки. Пружинные подвески при сейсмическом анализе трубопроводов могут не учитываться. При наличии в системе трубопроводов насоса или клапана следует оценить его влияние на реакцию. Следует принимать во внимание все дополнительные массы, включая их эксцентриситеты, например, приводные механизмы клапанов, насосы, жидкость в трубах и теплоизоляцию.

5.38. Когда распределительные системы соединяются с двумя или более точками, характеризующимися различным движением и применимыми спектрами реакции, следует проявлять осторожность при применении одного

спектра реакции конкретной точки опоры. Для учета инерционных эффектов следует применять либо огибающий спектр, либо несколько спектров. Однако результаты оказываются не всегда консервативными и при их оценке следует проводить инженерно-техническую экспертизу. Когда результаты ненадежны, следует использовать методы, в которых рассматривается возбуждение нескольких опор, в сочетании с модальным анализом.

5.39. Кроме воздействия инерционных сил, следует тщательно рассмотреть эффекты неравномерного колебания опор, поскольку полученный в условиях землетрясений опыт показывает, что это явление может быть основной причиной вызванного сейсмическими воздействиями разрушения систем трубопроводов.

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

### Аналитические методы для сооружений

5.40. Когда требуемым результатом численного анализа являются спектры реакций на перекрытиях зданий<sup>21</sup>, максимальные относительные смещения, относительные скорости, абсолютные ускорения и максимальные напряжения во время землетрясения, для большинства моделей обычно достаточно применения линейного динамического анализа (например, анализа с прямым интегрированием временных характеристик, модального анализа, частотного интегрирования и спектров реакций). В других случаях, когда это целесообразно или необходимо, следует использовать нелинейный динамический анализ (например, отрыв конструкций от основания, опоры с нелинейной зависимостью от нагрузки, свойства материалов фундаментов в проблемах взаимодействия грунта и сооружения или взаимодействия между твердыми частями).

5.41. Компромисс между линейными и нелинейными решениями определяется условиями в каждом отдельном случае: последние обычно требуют лучше определенных входных параметров, поскольку они вносят неопределенности. Поэтому решение следует принимать обоснованно, проводя параметрические исследования.

---

<sup>21</sup> Спектр реакции на перекрытиях здания – это спектр реакции перемещения перекрытия на определенном уровне здания при заданном исходном перемещении грунта.

5.42. Использование упрощенных методов, таких, как эквивалентные статические методы, следует ограничивать, применяя их только для целей оценки.

5.43. В методе спектров реакций, максимальную реакцию каждой моды следует рассчитывать путем прямого использования спектра реакции конструкции. Максимальную реакцию в каждом основном направлении следует определять с помощью соответствующего комбинирования модальных максимумов, такого, как квадратный корень из суммы квадратов каждой модальной реакции, или комплексная процедура квадратичной комбинации. Для близко расположенных модальных частот следует применять консервативную процедуру, суммируя абсолютные значения всех близко расположенных модальных и жестких реакций. Следует также тщательно оценивать и документировать недостающую массу как функцию деталей моделирования, предельных частот и модальных коэффициентов участия, используемых в анализе.

5.44. Реакции, связанные с воздействием ускорения в трех различных направлениях, следует объединять путем извлечения квадратного корня из суммы квадратов отдельных реакций. В некоторых государствах горизонтальное исходное движение определяется как результирующая в одном из двух стандартных горизонтальных ортогональных направлений и объединяется с вертикальным движением с целью определения реакции наихудшего случая.

5.45. В методе записей во времени<sup>22</sup> динамическую реакцию конструкции системы следует рассчитывать как функцию времени либо непосредственно, либо после преобразования в модальные координаты (только для линейных моделей). Исходное перемещение следует задавать в виде набора естественных или искусственных акселерограмм на уровне земли или на уровне определенного этажа, выбранного таким образом, чтобы он представлял проектный спектр реакции и другие характеристики сейсмической опасности (например, продолжительность).

5.46. Следует выбирать соответствующий шаг интегрирования по времени в соответствии с требуемым уровнем детализации результатов и с общими допущениями моделирования (например, плотностью разбиения).

---

<sup>22</sup> Записи во времени – это регистрация вызванных землетрясением движений во времени или движения в ответ на землетрясение во времени для конкретного этажа или на конкретном уровне для сооружения, опирающегося на землю.

5.47. При нелинейном анализе линейное комбинирование результатов различных сочетаний нагрузок не действительно. В таких случаях, после соответствующей валидации, следует применять консервативные процедуры с построением огибающей.

5.48. В отношении узлов категорий сейсмостойкости 1 и 3 методы, основанные на коэффициентах пластичности, применяемые либо к внутренним силам, оцененным линейно, либо к входным спектрам, следует использовать только для целей проверки. В отношении узлов категорий сейсмостойкости 2 и 4 можно в надлежащих случаях применять упрощенные процедуры с использованием коэффициентов пластичности, но следует обеспечивать соответствующее обоснование их значений с помощью либо метода испытаний, либо метода анализа.

### **Оценка спектров реакции на перекрытиях зданий**

5.49. Спектры реакции на перекрытиях зданий, обычно используемые в качестве исходных сейсмических данных для оборудования, следует получать на основе динамической реакции конструкции на проектное перемещение грунта. В качестве исходных данных для структурного анализа следует использовать естественные или искусственные записи движения во времени, которые, как может быть показано, способны обеспечить получение спектров реакций, по меньшей мере столь же консервативных, как спектры реакций для проектного перемещения грунта.

5.50. В качестве альтернативного решения для определения расчетных спектров реакций на перекрытиях зданий<sup>23</sup> могут использоваться прямые методы на основе упрощенных инженерно-технических допущений относительно связи между перемещением грунта в свободном поле и спектрами реакций на перекрытиях зданий. Однако консерватизм получаемых таким образом спектров реакции на перекрытиях зданий следует сравнивать с консерватизмом, обеспечиваемым в случае использования записей во времени.

---

<sup>23</sup> Расчетный спектр реакций на перекрытиях зданий – это спектр реакций для перемещения перекрытия на конкретном уровне здания, и его получают путем модификации одного или нескольких спектров реакции на перекрытиях зданий, с тем чтобы учесть вариабельность и неопределенность исходного перемещения грунта и характеристики здания и фундамента.

5.51. Следует провести, на основе рационального инженерно-технического заключения, критический обзор расчетных спектров реакции на перекрытиях зданий, в котором следует учитывать их форму и связь между вибрационными характеристиками здания и материалов основания фундамента.

5.52. Расчетные спектры реакции на перекрытиях зданий следует расширять таким образом, чтобы учесть возможные неопределенности в оценке вибрационных характеристик элементов здания<sup>24</sup>. Степень расширения может быть уменьшена, если выполняются параметрические исследования с целью учета неопределенностей, связанных с моделированием грунта. В качестве альтернативного варианта при анализе элементов могут последовательно использоваться сегменты расширенных спектров. Для систем, имеющих близко расположенные частоты, использование таких сегментированных спектров реакции способно помочь избежать чрезмерного консерватизма.

5.53. Следует учитывать изменение исходных данных спектров реакций на перекрытиях зданий для оборудования, которое крепится к весьма гибким конструктивным элементам (вертикальное усиление из-за вследствие податливости перекрытия), или когда возникают значительные крутильные колебания здания. Когда центр жесткости и центр инерции здания сильно не совпадают и когда это не учтено при моделировании конструкции здания, следует либо проанализировать в соответствии с нелинейными методиками узлы, расположенные далеко от центра жесткости, либо модифицировать спектры реакций на перекрытиях зданий, с тем чтобы учесть реакцию опорной конструкции на крутильные колебания.

5.54. Одновременно следует внести соответствующие модификации в спектры реакций на перекрытиях зданий, если происходит значительное проникновение в область нелинейной реакции конструкции. Следует обеспечивать, чтобы значение пластичности, связанное с любым узлом, соответствовало его структурной детализации.

### **Аналитические методы для оборудования**

5.55. Расчетные напряжения и нагрузки реакции в оборудовании и его опорных конструкциях следует получать в качестве непосредственных результатов применения динамического или статического анализа. Следует отметить, что

---

<sup>24</sup> Типичные значения, используемые в государствах, составляют от  $\pm 10\%$  до  $\pm 15\%$ .

электрооборудование, исключая анкерные устройства или опоры, оценивается обычно лишь на работоспособность посредством испытаний или использования данных опыта. Поэтому при анализе этих элементов с целью расчета передаточных функций для оборудования в шкафу или оценки нагрузок на анкерные устройства или опоры следует исходить из предположения об упругой реакции конструкции шкафа электрооборудования, панелей или стоек.

#### **Аналитические методы для распределительных систем**

5.56. Для распределительных систем (например, трубопроводов, кабельных желобов, кабельных каналов, труб и каналов и их опор) модальный анализ спектра реакции может использоваться при сейсмических расчетах трубопроводов большого диаметра (диаметр больше 60 мм) в системах, классифицированных по безопасности, в то время как статический метод обычно применяется для анализа трубопроводов малых диаметров. Таблицы и диаграммы зазоров, основанные на обобщенном анализе или испытаниях, также используются для оценки трубопроводов малых диаметров и, как правило, используются для оценки кабельных желобов, кабельных каналов, труб и каналов. Могут также использоваться упрощенные процедуры анализа или расчета, основанные на данных опыта, полученного в условиях реальных землетрясений. Следует обеспечивать полную валидацию всех таких упрощенных методов, с тем чтобы показать их степень консерватизма по сравнению с более совершенными методами моделирования, и их следует надлежащим образом документировать.

5.57. В некоторых государствах для трубопроводов малого диаметра, 60 мм или менее, используется модифицированный статический метод. В качестве расчетного ускорения задается максимальное ускорение проектного спектра реакции в диапазоне частот от  $0,5f_f$  до  $2,0f_f$  (где  $f_f$  – собственная частота оборудования). Затем вводится соответствующий коэффициент усиления, обычно выбираемый равным 1,0–1,5 в зависимости от числа опор. Перед применением такого подхода следует подтверждать его пригодность с помощью строгих аналитических или экспериментальных методов.

## **6. АТТЕСТАЦИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ПОСРЕДСТВОМ ИСПЫТАНИЙ, НА ОСНОВЕ ОПЫТА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, И С ПОМОЩЬЮ КОСВЕННЫХ МЕТОДОВ**

### **АТТЕСТАЦИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ПОСРЕДСТВОМ ИСПЫТАНИЙ**

#### **Тип испытаний и типичные области применения**

6.1. Методом прямой аттестации сейсмостойкости узлов является испытание реального узла или его прототипа. Если конструктивную целостность или функциональные возможности узла не представляется возможным подтвердить посредством анализа с достаточной степенью достоверности, следует провести испытание с целью проверки узла или получения дополнительных прямых или косвенных данных для его аттестации.

6.2. Виды испытаний могут быть следующими:

- испытания на утверждение типа (испытания на разрушение);
- приемочные испытания (на соответствие техническим условиям);
- испытания с низким импедансом (испытание на динамические характеристики);
- испытания с целью верификации компьютерных кодов.

6.3. Испытания с целью аттестации узлов категорий сейсмостойкости 1 и 3 следует проводить, когда виды отказов не представляется возможным определить посредством анализа или опыта, полученного в условиях реальных землетрясений. В случае прямой аттестации используют испытания на утверждение типа и приемочные испытания на соответствие техническим условиям. Испытания с низким импедансом (на динамические характеристики) следует сводить к определению подобия или к проверке аналитических моделей. Испытания с целью верификации компьютерных кодов следует использовать для общей верификации аналитических процедур, в которых обычно используются компьютерные коды. Методы испытаний зависят от требующихся исходных параметров, веса, размера, конфигурации и эксплуатационных характеристик узла и характеристик используемой испытательной установки.

6.4. Испытания на утверждение типа (испытания на разрушение) следует использовать для стандартных электрических и механических элементов, когда

необходимо провести оценку проектных запасов надежности до отказа, повреждения или нелинейной реакции и определить вид отказа на нижнем пределе. Такие испытания обычно проводятся на вибростенде. Следует обеспечивать, чтобы при испытаниях на разрушение имелась возможность обнаружения неожиданных видов отказов или потенциальных сбоев в работе, поскольку условия испытаний обычно охватывают более широкий спектр нагрузок, чем нагрузки, которые требуются в проектных основах, что позволяет также получить информацию о поведении в запроектных условиях.

6.5. Приемочные испытания (на соответствие техническим условиям) также используется для определения соответствия электрических и механических элементов требованиям сейсмостойкости. Обычно они проводятся изготовителями для подтверждения соответствия техническим условиям на поставку и их не следует использовать для оценки запасов сейсмостойкости или анализа видов отказов. Такие испытания обычно проводятся на вибростенде.

6.6. Испытания с целью верификации компьютерных кодов важны для надежной аналитической работы. Компьютерные коды следует верифицировать до их применения, используя для этого достаточный объем результатов испытаний или результатов применения других соответствующих компьютерных кодов или аналитических процедур. Следует устанавливать связь между результатами испытаний, охватывающими представляющий интерес диапазон, и результатами анализа [12, 17].

### **Испытательные устройства**

6.7. Испытания на утверждение типа и приемочные испытания обычно проводятся в лаборатории. Следует иметь в наличии одну или несколько следующих установок:

- вибростенд (с одной или несколькими степенями свободы);
- гидравлический приводной механизм (обычно требуются большие и жесткие стены);
- электрический приводной механизм;
- механический приводной механизм (с несбалансированной массой);
- ударный молот;
- подрывное устройство.

6.8. В случае проведения в полевых условиях испытаний с низким импедансом (на динамические характеристики) узлы обычно испытывают посредством механического, ударного, взрывного воздействия и применения



других низкоэнергетических возбудителей, а также путем возбуждения окружающей среды. Эти испытания не следует использовать для прямой аттестации сейсмостойкости узла, но они могут применяться для определения динамических характеристик, в том числе опор, и полученные данные могут затем использоваться при анализе или в других испытаниях с целью аттестации интересующего узла.

## Планирование испытаний

6.9. Проведение значимого испытания с целью оценки целостности или функциональных возможностей узла требует правильного или консервативного моделирования условий, существующих для этого узла на станции во время землетрясения, или обеспечения того, чтобы любое отклонение от этих условий не оказывало значительного влияния на результаты. Среди этих условий наиболее важными являются:

- исходные параметры колебаний;
- граничные (вспомогательные) условия;
- окружающие условия (например, давление и температура);
- эксплуатационные условия (если оцениваются функциональные возможности).

6.10. В ходе испытаний узел следует подвергать воздействию консервативно определенных испытательных условий, для того чтобы получить не менее тяжелые воздействия, чем при проектном сейсмическом событии, совпадающем с воздействием других применимых эксплуатационных или проектных условий. Отклонения следует оценивать в каждом конкретном случае.

6.11. Испытания могут проводиться на площадке или в лаборатории. Испытания оборудования и элементов на площадке следует проводить с целью аттестации только по некоторым аспектам, поскольку это оказывается дорогостоящим и часто вступает в противоречие с доступностью. Они представляют собой надежную стратегию для оценки реальных эффектов, связанных с опорами, граничными условиями и процессами старения. Испытания сооружений на площадке зачастую являются единственным способом сбора данных о фактических свойствах материалов, глобальном сейсмическом поведении конструкций и эффектах взаимодействий грунт-конструкция, и, когда это возможно, их следует проводить с целью получения результатов в качестве эталона для аналогичных сооружений.

6.12. Следует обеспечивать соответствие исходных колебаний сейсмической категоризации подвергаемого испытаниям узла, с тем чтобы достигалась уверенность в требуемом запасе безопасности.

6.13. Функциональные испытания и испытания на конструктивную целостность таких сложных узлов, как пульты управления, содержащие множество различных устройств, следует проводить на прототипе самого узла или на отдельных устройствах при скорректированных по масштабу исходных сейсмических параметрах испытания с учетом расположения и крепления устройства внутри узла или на нем (через функцию передачи воздействий внутрь корпуса).

6.14. Следует учитывать эффекты старения, которые могут приводить к ухудшению параметров или иным образом изменять характеристики узла в течение его срока службы.

6.15. Испытания на сейсмостойкость могут проводиться на самом узле, на полномасштабной модели или, в соответствующих случаях, на уменьшенных моделях. Однако для целей аттестации следует проводить испытания самого элемента или его полномасштабной модели без каких-либо упрощений; если нет другой практической альтернативы, для целей аттестации допускается осторожное использование модели уменьшенного масштаба. Такие испытания включают:

- (a) функциональные испытания для обеспечения требуемой функции безопасности элемента или отсутствия нарушений в работе в переходном режиме во время и после землетрясения;
- (b) испытания на конструктивную целостность для проверки механической прочности элемента.

6.16. При проведении испытаний на уменьшенной модели следует учитывать требования в отношении подобию, связанные с применением косвенных методов аттестации сейсмостойкости.

6.17. Любой результат испытаний следует сопровождать детальной оценкой надежности измерений (обычно получаемой посредством статистического анализа), оценкой отношения «сигнал-шум» и оценками чувствительности, с четким указанием численных (связанных с обработкой данных) и физических (связанных с допущениями при моделировании) источников неопределенностей.

## Проведение испытаний

6.18. Число повторов испытаний или циклов нагружения в течение испытания зависит от применения, однако для оценки результатов и аттестации на срок службы узла следует учитывать накопление повреждений различных типов, связанных с усталостью или явлениями ползучести при циклическом нагружении (рэтчетинг).

6.19. В случае элементов, функциональные возможности которых следует подтверждать посредством испытаний в условиях землетрясения, возбуждение поочередно в каждом направлении можно считать достаточным при соблюдении одного из следующих условий:

- (а) если результаты проверки конструкции элемента и его внешнего осмотра ясно показывают, что воздействия возбуждения на данный элемент в трех направлениях достаточно независимы друг от друга;
- (б) если условия испытаний на вибростенде могут быть настолько ужесточены, чтобы учесть эффекты взаимодействия при одновременном возбуждении колебаний в трех направлениях (например, можно увеличивать амплитуду возбуждаемых колебаний в одном направлении, чтобы охватить реакцию в другом направлении благодаря эффектам взаимосвязи).

В противном случае следует применять одновременное воздействие в нескольких направлениях.

6.20. При использовании случайных или многочастотных исходных колебаний следует применять соответствующие процедуры. Продолжительность исходных колебаний следует устанавливать в соответствии с ожидаемой продолжительностью землетрясения [2].

6.21. Для аттестационных испытаний жестких систем можно использовать простые синусоидальные колебания или синусоидальные колебания с биениями на частоте, значительно меньшей, чем собственная частота первой моды системы. Это в результате даст испытательный спектр реакции, который огибает стандартный спектр реакции, необходимый для аттестации узла. Если соответствующего вибрационного устройства нет, для получения необходимого для проведения аттестации уровня реакции узла могут использоваться простые синусоидальные колебания на резонансной частоте.

6.22. Если система имеет один или несколько колебательных резонансов в представляющем интерес диапазоне частот, то следует обеспечивать, чтобы спектр реакции исходных колебаний при испытании был не меньше требуемого проектного спектра реакции. Это может быть достигнуто путем использования в качестве вводных параметров записей колебаний во времени, испытательный спектр реакции которых охватывает стандартный спектр реакции, необходимый для аттестации узла.

6.23. При наличии достаточных интервалов между собственными частотами узла можно проводить независимые испытания, например, с соответственно масштабированными<sup>25</sup> синусоидальными исходными колебаниями заданной частоты с полусинусоидальной или другой представляющей интерес временной огибающей. Однако такие испытания следует проводить с использованием двух или большего числа записей колебаний во времени или реальных записей во времени, спектры реакции которых не ниже требуемого проектного спектра реакции. Использование набора различных записей колебаний во времени позволяет исключить недостатки, которые могут возникать из-за особенностей одной записи колебаний во времени.

6.24. Собственные частоты и другие вибрационные характеристики элементов могут обычно оцениваться посредством испытания на характеристики колебаний с низким импедансом (для которого можно использовать исходное ускорение низкого уровня в диапазоне от  $0,01g$  до  $0,05g$ ).

6.25. Следует отметить, что для нелинейных систем результаты испытаний с низким импедансом или уровнем возбуждения могут отличаться от результатов испытаний, проведенных с более высокими уровнями сейсмических нагрузок. Для целей использования при аттестации оборудования на сейсмостойкость требуется, чтобы при испытаниях с низким импедансом реакция оборудования была в основном линейной до уровней возбуждения, соответствующих потенциальным видам отказов, с тем чтобы можно было определить проектные запасы.

6.26. В целом следует заранее определять функциональные требования для активных узлов (т.е. тех, которые перемещаются или состояние которых изменяется иным образом) в рамках процедуры испытаний. В большинстве случаев требуется, чтобы активные узлы выполняли свою активную функцию

---

<sup>25</sup> 'Соответственно масштабированные' означает, что амплитуда испытательного спектра на представляющий интерес частоте выше амплитуды требуемого спектра.

по окончании вызванного землетрясением возбуждения. Однако, если они должны выполнять такие активные функции во время вызванного землетрясением возбуждения или во время потенциальных афтершоков, это следует учитывать при определении функциональных требований для испытаний. Следует также обеспечивать, чтобы испытания функциональных возможностей соответствовали требуемым функциям безопасности в процессе эксплуатации<sup>26</sup>.

6.27. Особенно важными являются функциональные требования, предъявляемые к компьютеру, используемому для управления или оценки данных. Обеспечение сейсмостойкости такого оборудования – очень сложный процесс, и обнаружение неправильного срабатывания или отказа может быть затруднено. Следует разрабатывать специализированные процедуры, включая спецификацию испытаний на соответствие заданным техническим условиям, подлежащих выполнению во время испытания и после него.

6.28. В соответствии с специализированными процедурами обеспечения качества следует выполнять перечисленные ниже действия:

- (a) все испытательное оборудование следует калибровать и следует вести документацию по проведенным калибровкам;
- (b) для всего программного обеспечения, используемого для управления испытательным оборудованием, следует иметь проверочную документацию.

#### АТТЕСТАЦИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ НА ОСНОВЕ ОПЫТА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

6.29. Прямая аттестация сейсмостойкости узлов с использованием опыта сейсмических событий с сильными смещениями имеет ограниченное применение, которое, однако, расширяется. Только в последние годы были накоплены данные о сильных землетрясениях с достаточным уровнем качества и детализации, требующимися для получения информации, необходимой для прямого применения к отдельным узлам.

---

<sup>26</sup> Например, в случаях, когда для изменения состояния схемы необходимо размыкание контактов реле как минимум на 20 мс, недопустимым является загорание лампы сигнализации в результате нескольких миллисекунд вибрации реле во время землетрясения.

6.30. Следует обеспечивать, чтобы уровень сейсмического возбуждения, испытываемого во время реального землетрясения узлом, идентичным аттестуемому узлу, эффективно охватывал проектные сейсмические колебания в точке установки узла в здании. Следует обеспечивать, чтобы аттестуемый узел и узел, который подвергся сильному воздействию, были одной и той же модели и одинакового типа или имели одинаковые физические характеристики и схожие характеристики опор или крепления. В случае активных узлов следует показывать, что во время или после землетрясения, включая любые эффекты афтершока, данный узел выполнял те же функции, которые будут требоваться от узлов категории сейсмостойкости 1 или 3.

6.31. В целом следует обеспечивать, чтобы качество и степень детализации информации, используемой для аттестации отдельных узлов непосредственно на основе данных опыта, были не ниже тех, которые требуются для прямой аттестации методами анализа или испытаний. Как и в случае для прямой аттестации методами анализа или испытаний, опыт, полученный в условиях землетрясений, может использоваться в качестве основы для аттестации также косвенным методом.

## АТТЕСТАЦИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ С ПОМОЩЬЮ КОСВЕННЫХ МЕТОДОВ

6.32. Косвенный метод аттестации основан на установлении подобия между проверяемым узлом и эталонным узлом, ранее аттестованным посредством анализа, испытаний или на основе опыта, полученного в условиях землетрясений. Большие объемы данных по опыту, полученному в условиях землетрясений, в частности, данных, которые могут быть применены для аттестации сейсмостойкости распределительных систем, в определенной степени использовались для обоснования упрощения аналитической оценки и аттестации сейсмостойкости таких систем<sup>27</sup>. Аттестация сейсмостойкости кабельных желобов является примером упрощенной аналитической оценки, основанной на данных опыта, полученного в условиях землетрясения.

---

<sup>27</sup> Использование коэффициента трехкратной собственной массы для пределов критериев нормального поведения допускается в отношении кабельных желобов с пластичными опорами (что позволяет предусматривать значительные поперечные смещения без разрушения).

6.33. Следует обеспечивать, чтобы исходные сейсмические параметры, используемые для аттестации проверяемого узла, охватывали проектные спектры для этого узла и исходные сейсмические параметры, используемые для эталонного узла; следует также обеспечивать, чтобы последние соответствовали параметрам, требуемым для проверяемого узла, или превышали их. При выборе исходных параметров для масштабных моделей следует учитывать соответствующие соотношения подобия. Следует обеспечивать, чтобы условия физического состояния и опор, функциональные характеристики активных узлов и требования, предъявляемые к проверяемому узлу, имели близкое сходство с параметрами эталонного узла.

6.34. Надежность применения косвенных методов зависит от соответствующего формулирования и применения строгих и легко поддающихся проверке критериев подобия. Валидация таких критериев и компетентная подготовка кадров группы по рассмотрению играют ключевую роль в данном процессе, и эту деятельность следует четко фиксировать в документации по безопасности.

6.35. В тех случаях, когда косвенные методы используются в отношении узлов категории сейсмостойкости 2, применение критериев подобия следует проверять посредством осмотра, проводимого опытным экспертом. В частности, ввиду большого числа самых различных потенциальных взаимодействий, вызываемых сейсмическим воздействием (в результате соударений, выбросов вредных веществ, или пожаров или наводнений, или вследствие землетрясения), и важности надлежащего крепления и обеспечения опоры для конструкций, оборудования и распределительных систем, перед эксплуатацией следует обеспечивать осмотр всех прошедших сейсмическую аттестацию узлов атомной электростанции инженерами - строителями, являющимися специалистами в области сейсмического проектирования и располагающими опытом, связанным с реальными землетрясениями.

6.36. Цель этого подхода к аттестации сводится к обеспечению того, чтобы, 'будучи смонтированными', узлы обладали способностью выдерживать проектные сейсмические воздействия без потери конструктивной целостности

с учетом характера крепления и влияния сейсмического взаимодействия<sup>28</sup> (на узлы и операторов).

6.37. Регистрационные записи подготовки кадров для инженеров, которые проводят сейсмический осмотр, и подтверждения того, что были выполнены соответствующие критерии, следуют подшивать в документацию по безопасности для аттестации в соответствии с применимыми процедурами обеспечения качества.

## **7. СЕЙСМИЧЕСКИЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

7.1. Сейсмические контрольно-измерительные приборы могут быть установлены на атомных станциях по следующим причинам:

- (a) для мониторинга поведения конструкций: с целью сбора данных о динамическом поведении КСЭ атомной электростанции и оценки степени пригодности аналитических методов, используемых при проектировании сейсмостойких конструкции и аттестации зданий и оборудования;
- (b) для сейсмического мониторинга: с целью обеспечения подачи тревожных сигналов и предупреждения операторов о потенциальной необходимости останова станции, в зависимости от результатов инспекций, проводимых после землетрясения;
- (c) для автоматических систем быстрого останова: в качестве механизмов запуска режима автоматического останова станции.

---

<sup>28</sup> Сейсмическое взаимодействие — это взаимодействие, инициируемое землетрясением и приводящее к такому влиянию одного узла на другой или узла на оператора, которое может ухудшить их способность выполнять предписанную им функцию безопасности. Взаимодействия могут быть механическими (удары, столкновения, износ и взрыв), химическими (выброс токсичных или удушающих веществ), радиологическими (увеличение дозы) или могут быть связаны с пожаром или наводнением, вызванным землетрясением.



7.2. Решения относительно количества устанавливаемых сейсмических контрольно-измерительных приборов, их классификации безопасности и их категорий сейсмостойкости следует принимать на основе актуальности постулируемого сейсмического исходного события для проектирования систем и, в целом, на основе значимости контрольно-измерительных приборов для осуществления на станции аварийных процедур. Следует обеспечивать правильную классификацию по безопасности и надлежащее резервирование установленных на станции систем сейсмического мониторинга и автоматических систем быстрого останова.

7.3. Следует обеспечивать калибровку и техническое обслуживание установленных на атомной станции сейсмических контрольно-измерительных приборов в соответствии с письменными регламентами технического обслуживания.

## СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СООРУЖЕНИЙ

7.4. На каждой площадке атомной станции следует предусматривать указанное ниже минимальное количество сейсмических контрольно-измерительных приборов:

- один самописец для трехкомпонентной регистрации сильных колебаний, устанавливаемый с целью регистрации колебаний в свободном пространстве;
- один самописец для трехкомпонентной регистрации сильных колебаний, устанавливаемый с целью регистрации колебаний фундамента здания реактора;
- один самописец для трехкомпонентной регистрации сильных колебаний, устанавливаемый на наиболее представительном междуэтажном перекрытии здания реактора.

Следует рассматривать целесообразность установки дополнительных сейсмических контрольно-измерительных приборов на площадках, на которых ускорение на свободной поверхности SL-2 равно или превышает 0,25g.

7.5. Следует на регулярной основе проводить сбор и анализ данных в поддержку периодического рассмотрения безопасности станции.

## СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ БЫСТРОГО ОСТАНОВА

7.6. Решение о целесообразности поддержки работы автоматической системы быстрого останова или действий оператора в случае землетрясения сейсмическим мониторингом следует принимать с учетом изложенных ниже соображений:

- (a) уровень, частота и продолжительность сейсмических явлений на площадке атомной электростанции: наличие автоматической системы для площадок, расположенных в районах низкой сейсмической активности, оказывается обоснованным лишь в редких случаях;
- (b) сейсмостойкость систем атомной станции: автоматические системы следует использовать в качестве дополнительной защитной меры, особенно в случае обновления сейсмических проектных основ;
- (c) соображения безопасности, связанные с ложными быстрыми остановами: автоматическую систему не следует использовать для мест с высокими уровнями фоновых шума, в том числе шума, создаваемого другим оборудованием станции;
- (d) Оценка эффектов суперпозиции ускорения, создаваемого землетрясением, на сейсмический переходный процесс, индуцируемый автоматическим быстрым остановом. В некоторых случаях такая комбинация может создать более значительные проблемы для безопасности станции, чем сценарий с воздействием землетрясения на станцию при ее эксплуатации;
- (e) широкие вопросы безопасности, касающиеся последствий для государства останова станции сразу же после землетрясения. В государствах с ограниченной энергосетью и небольшим числом сейсмически аттестованных электростанций может оказаться весьма важным наличие энергоснабжения в случае аварийной ситуации и поэтому автоматический быстрый останов следует использовать только в том случае, если установлено, что возникла угроза для безопасности станции;
- (f) уровень уверенности оператора и надежности: в случае неавтоматической системы оператор играет важную роль в принятии решений относительно действий после землетрясения и поэтому следует обеспечивать его надлежащую подготовку на случай подобных обстоятельств.

7.7. Нижний уровень срабатывания (предупреждение об опасности) следует задавать близким к SL-1 (обычно связанному с эксплуатационными пределами), при котором не ожидается значительного повреждения узлов, связанных с безопасностью. Если общий уровень сейсмостойкости станции оказался ниже,

чем SL-1 (например, в результате сейсмической повторной оценки), нижний уровень срабатывания следует соотносить с фактической сейсмостойкостью станции.

7.8. Для автоматической системы наивысший пороговый уровень и уровень срабатывания системы аварийного быстрого останова реактора следует определять с учетом SL-2 и того факта, что обычно при землетрясениях такого уровня в окрестностях площадки будут ожидать значительные разрушения, сопровождаемые возможной потерей внешнего электроснабжения и прекращением водоснабжения, необходимого для отвода остаточного тепла. Следует обеспечивать, чтобы все аварийные процедуры и действия оператора соответствовали такому сценарию.

7.9. Датчики следует располагать предпочтительно в свободном поле и в местах нахождения связанного с безопасностью оборудования на станции. Уровни срабатывания следует адаптировать в соответствии с местами нахождения датчиков на станции и результатами сейсмического динамического анализа. Для площадок многоблочной станции следует координировать логику быстрого останова различных блоков.

7.10. Пульта управления системы следует размещать в помещении щита управления станции, обеспечивая легкий доступ к нему оператора.

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ

7.11. Следует обеспечивать, чтобы как действия оператора после землетрясения, так и работа автоматической системы быстрого останова базировались на надлежащем наборе параметров, задаваемых на основе зарегистрированных данных, и предусматривать соответствующую обработку данных с двумя основными целями:

- 1) исключение ложных сигналов;
- 2) получение данных о повреждении для сравнения с допущениями, сделанными на этапе проектирования сейсмостойких конструкций.

7.12. Эти две цели достигаются путем применения соответствующего программного обеспечения, выполняющего анализ комбинации сигналов для различных мест и направлений (ложные сигналы могут быть отфильтрованы), при соответствующей фильтрации частот сигнала (с целью удаления части

сигнала, не связанной с информацией о повреждениях) и оценке параметров суммарного повреждения, с подтверждением посредством осмотра станции.

7.13. Следует обеспечивать, чтобы параметры суммарного повреждения базировались главным образом на интеграции регистрируемых данных скорости, позволяя таким образом получать более представительный параметр вызванного землетрясением повреждения оборудования, связанного с безопасностью. Такие глобальные значения следует сравнивать со значениями тех же величин, полученными для условий проектного землетрясения в свободном поле, и с данными опыта, связанного с реальными землетрясениями. Аналогичные сравнения следует проводить для других мест нахождения станции, так как они могут предоставить ценную информацию в поддержку осмотра станции после землетрясения и, следовательно, для принятия решения относительно возобновления эксплуатации станции.

## МЕРЫ, ПРИНИМАЕМЫЕ ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

7.14. Даже если на атомной станции установлена автоматическая система быстрого останова, следует запланировать меры, принимаемые на станции после землетрясения.

7.15. Следует предусматривать информирование оператора щита управления о возникновении землетрясения с помощью установленных сейсмических контрольно-измерительных приборов. Следует обеспечивать, чтобы последующие меры реагирования включали оценку зарегистрированного во время землетрясения колебания по сравнению с конкретными проектными параметрами узлов, связанных с безопасностью, оценку, посредством осмотра, повреждений на станции и оценку готовности станции к возобновлению (или продолжению) эксплуатации по окончании землетрясения.

7.16. Следует обеспечивать соответствие перечня подлежащих инспектированию узлов категориям безопасности и сейсмостойкости узлов станции. Следует четко определять характер, объем и место проведения испытаний, выполняемых после землетрясения, и непосредственно связывать их с ожидаемыми в результате землетрясения повреждениями. По практическим соображениям испытания могут быть ограничены визуальным контролем доступных узлов и обоснованным сравнением с сейсмическим поведением всех других узлов, связанных с безопасностью.

7.17. Различные уровни таких инспекций могут определяться в соответствии с уровнем повреждений в результате землетрясения (измеренным с использованием соответствующих аналитических параметров): в связи с этим следует установить различные обязанности операторов, персонала технической поддержки на станции и внешних специализированных групп.

7.18. В соответствующих регламентах следует предусматривать немедленное оповещение регулирующего органа и его участие в повторном запуске станции.

7.19. Рекомендации и руководящие материалы по эксплуатационным процедурам, выполняемым после землетрясения, включая сроки выполнения необходимых действий, соответствующие обязанности и осуществляемый контроль, содержатся в [13].

## Дополнение

### ДОПОЛНЕНИЕ: ПРИМЕРЫ РАЗБИЕНИЯ ПО КАТЕГОРИЯМ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

А.1. Ниже приводится типичный перечень узлов категории сейсмостойкости 1 (этот перечень не является всеобъемлющим):

- (a) технологические системы:
  - система теплоносителя первого контура,
  - главная система паропроводов и трубопроводов питательной воды,
  - система отвода остаточного тепла,
  - система привода управляющих стержней,
  - система аварийного впрыска теплоносителя,
- (b) электрические системы:
  - система аварийного энергоснабжения, включая дизель-генераторы, вспомогательное оборудование и распределительные системы,
- (c) контрольно-измерительные приборы и системы управления:
  - системы управления и защиты реактора, требуемые для выполнения функций безопасного останова,
  - контрольно-измерительные приборы мониторинга для измерения важных параметры функций безопасности,
  - помещения щита управления, требуемые для безопасного останова;
- (d) конструкции и здания, в которых размещаются или которые поддерживают системы безопасного останова, системы энергоснабжения и контрольно-измерительные приборы и системы управления (в том числе защитная оболочка);
- (e) плотины или дамбы для защиты площадки.

А.2. Узлами категории сейсмостойкости 2, которые могут оказывать влияние на функции безопасности узлов категории сейсмостойкости 1 или 3 или на связанные с безопасностью действия оператора, являются, например:

- машинный зал,
- вентиляционная труба,
- водозаборные сооружения охлаждающей воды,
- подъездные пути.

А.3. Вызываемые сейсмическими явлениями разрушение, падение, смещение или пространственное реагирование конструкций и оборудования категории

сейсмостойкости 2 могут становиться причиной или приводить, например, к следующим явлениям:

- нагрузкам, создаваемым обломками,
- летящим предметам, образующимся при разрушении вращающихся машин,
- возникновению волн давления вследствие разрыва резервуаров,
- блокированию трубопроводов аварийного охлаждения,
- наводнениям,
- пожарам,
- выбросам опасных веществ.

А.4. Узлами категории сейсмостойкости 3 являются, например:

- здание хранилища отработавшего топлива,
- здание хранилища радиоактивных отходов.

А.5. Узлами категории сейсмостойкости 4 являются, например:

- здания складов и цехов,
- здание столовой,
- здание администрации.

## СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- [1] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Безопасность атомных электростанций: проектирование, Серия норм безопасности № NS-R-1, МАГАТЭ, Вена (2003).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-3.3, IAEA, Vienna (2002).
- [3] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Геотехнические аспекты оценки площадок и оснований АЭС, Серия норм безопасности № NS-G-3.6, МАГАТЭ, Вена (2005).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-1.5, IAEA, Vienna (2003).
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-1.9, IAEA, Vienna (2004).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design of the Reactor Containment System for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-1.10, IAEA, Vienna (2004).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design of Emergency Power Systems for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-1.8, IAEA, Vienna (2004).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-1.3, IAEA, Vienna (2002).
- [9] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Оценка безопасности и независимая проверка для атомных электростанций, Серия норм безопасности № NS-G-1.2, МАГАТЭ, Вена (2004).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Evaluation of the Safety of Operating Nuclear Power Plants Built to Earlier Standards: A Common Basis for Judgement, Safety Reports Series No. 12, IAEA, Vienna (1998).
- [11] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Обеспечение качества для безопасности атомных электростанций и других ядерных установок, Серия изданий по безопасности, № 50-C/SG-Q, МАГАТЭ, Вена (1998).
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Quality Assurance for Software Important to Safety, Technical Reports Series No. 397, IAEA, Vienna (2000).
- [13] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Пределы и условия для эксплуатации и эксплуатационные процедуры для атомных электростанций, Серия норм безопасности № NS-G-2.2, МАГАТЭ, Вена (2004).
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Format and Content of the Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-4.1, IAEA, Vienna (2004).



- [15] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Безопасность атомных электростанций: эксплуатация, Серия норм безопасности № NS-R-2, МАГАТЭ, Вена (2003).
- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-2.10, IAEA, Vienna (2003).
- [17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Software for Computer Based Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-1.1, IAEA, Vienna (2000).

## **СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ**

|             |                                                            |
|-------------|------------------------------------------------------------|
| Contri,P.   | Международное агентство по атомной энергии                 |
| Danisch,R.  | Siemens Nuclear Power GmbH, Германия                       |
| Guelkan, P. | Ближневосточный технический университет,<br>Анкара, Турция |

Настоящая публикация была заменена публикацией SSG-67.

## ОРГАНЫ, УЧАСТВУЮЩИЕ В ОДОБРЕНИИ НОРМ БЕЗОПАСНОСТИ

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

### Комиссия по нормам безопасности

*Аргентина: Oliveira, A.; Бразилия: Caubit da Silva, A.; Канада: Pereira, J.K.; Китай: Zhao, C.; Франция: Lacoste, A.-C.; Gauvain, J.; Германия: Renneberg, W.; Индия: Sukhatme, S.P.; Япония: Suda, N.; Корея, Республика: Eun, S.; Российская Федерация: Вишневский, Ю.Г.; Испания: Azuara, J.A.; Santoma, L.; Швеция: Holm, L.-E.; Швейцария: Schmocker, U.; Украина: Грищенко, В.; Соединенное Королевство: Williams, L.G. (председатель); Папе, R.; Соединенные Штаты Америки: Travers, W.D.; МАГАТЭ: Karbassioun, A. (координатор); Международная комиссия по радиологической защите: Clarke, R.H.; Агентство по ядерной энергии ОЭСР: Shimomura, K.*

### Комитет по нормам ядерной безопасности

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

### Комитет по нормам радиационной безопасности

*Аргентина: Rojkind, R.H.A.; Австралия: Mason, C. (председатель), Беларусь: Рыдлевский, Л.; Бельгия: Smeesters, P.; Бразилия: Amaral, E.; Канада: Utting, R.; Куба: Betancourt Hernandez, A.; Китай: Yang, H.; Чешская Республика: Drabova, D.; Дания: Ulbak, K.; \*Египет: Hanna, M.; Финляндия: Markkanen, M.; Франция: Piechowski, J.; Германия: Landfermann, H.; Венгрия: Koblinger, L.; Индия: Sharma, D.N.; Ирландия: McGarry, A.; Израиль: Laichter, Y.; Италия: Sgrilli, E.; Япония: Yonehara, H.; Корея, Республика: Kim, C.; \*Мадагаскар: Andriambololona, R.; Мексика: Delgado Guardado, J.; Нидерланды: Zuur, C.; Норвегия: Saxebol, G.; Перу: Medina Gironzini, E.; Польша: Merta, A.; Российская Федерация: Кутков, В.; Словакия: Jurina, V.; Южная Африка: Olivier, J.H.L.; Испания: Amor, I.; Швеция: Hofvander, P.; Мoberg, L.; Швейцария: Pfeiffer, H.J.; \*Таиланд: Pongpat, P.; Турция: Buyan, A.G.; Украина: Лихтарев, И.А.; Соединенное Королевство: Robinson, I.; Соединенные Штаты Америки: Paperiello, C.; МАГАТЭ: Bilbao, A.; Европейская комиссия: Janssens, A.; Kaiser, S.; Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций: Rigney, C.; Международная комиссия по радиологической защите: Valentin, J.; Международное бюро труда: Niu, S.; Международная ассоциация радиационной защиты: Webb, G.; Международная организация по стандартизации: Perrin, M.; Агентство по ядерной энергии ОЭСР: Lazo, T.; Панамериканская организация здравоохранения: Borrás, C.; Научный комитет ООН по действию атомной радиации: Gentner, N.; Всемирная организация здравоохранения: Kheifets, L.*

### Комитет по нормам безопасности перевозки

*Аргентина: López Vietri, J.; Австралия: Colgan, P.; \*Беларусь: Зайцев, С.; Бельгия: Cottens, E.; Бразилия: Bruno, N.; Болгария: Бакалова, А.; Канада: Viglasky, T.; Китай: Pu, Y.; \*Дания: Hannibal, L.; \*Египет: El-Shinawy, R.M.K.; Франция: Aguilar, J.; Германия: Rein, H.; Венгрия: Sáfár, J.; Индия: Nandakumar, A.N.; Ирландия: Duffy, J.; Израиль: Koch, J.; Италия: Trivelloni, S.; Япония: Hamada, S.; Корея, Республика: Kwon, S.-G.; Нидерланды: Van Halem, H.; Норвегия: Hornkjøl, S.; \*Перу: Regalado Campaña, S.; Румыния: Vieru, G.; Российская Федерация: Ершов, В.Н.; Южная Африка: Jutle, K.; Испания: Zamora Martin, F.; Швеция: Pettersson, B.G.; Швейцария: Knecht, B.; \*Таиланд: Jerachanchai, S.; Турция: Köksal, M.E.; Соединенное Королевство: Young, C.N. (председатель); Соединенные Штаты Америки: Brach, W.E.; McGuire, R.; Европейская комиссия: Rossi, L.; Международная ассоциация воздушного транспорта: Abouchaar, J.; МАГАТЭ: Pore, R.B.; Международная организация*

*гражданской авиации: Rooney, К.; Международная федерация ассоциаций линейных пилотов: Tisdall, А.; Международная морская организация: Rahim, I.; Международная организация по стандартизации: Malesys, Р.; Экономическая комиссия Организации Объединенных Наций для Европы: Kervella, О.; Всемирный институт по ядерным перевозкам: Lesage, М.*

#### **Комитет по нормам безопасности отходов**

*Аргентина: Siraky, G.; Австралия: Williams, G.; \*Беларусь: Роздяловская, Л.; Бельгия: Baekelandt, L. (председатель); Бразилия: Xavier, А.; \*Болгария: Симеонов, Г.; Канада: Ferch, R.; Китай: Fan, Z.; Куба: Benitez, J.; \*Дания: Øhlenschlaeger, М.; \*Египет: Al Adham, К.; Al Sorogi, М.; Финляндия: Rukola, Е.; Франция: Averous, J.; Германия: von Dobschütz, Р.; Венгрия: Czoch, I.; Индия: Raj, К.; Ирландия: Pollard, D.; Израиль: Avraham, D.; Италия: Dionisi, М.; Япония: Irie, К.; Корея, Республика: Sa, S.; \*Мадагаскар: Andriambolona, R.; Мексика: Maldonado, Н.; Нидерланды: Selling, Н.; \*Норвегия: Sorlie, А.; Пакистан: Qureshi, К.; \*Перу: Gutierrez, М.; Российская Федерация: Полуэктов, П.П.; Словакия: Konecny, L.; Южная Африка: Pather, Т.; Испания: O'Donnell, Р.; Швеция: Wingefors, S.; Швейцария: Zurkinden, А.; \*Таиланд: Wangcharoenroong, В.; Турция: Kahraman, А.; Соединенное Королевство: Wilson, С.; Соединенные Штаты Америки: Greeves, J.; Wallo, А.; МАГАТЭ: Hioki, К. (координатор); Европейская комиссия: Taylor, D.; Webster, S.; Международная комиссия по радиологической защите: Valentin, J.; Международная организация по стандартизации: Hutson, G.; Агентство по ядерной энергии ОЭСР: Riotte, Н.*

Настоящая публикация была заменена публикацией SSG-67.