РУКОВОДСТВА ПО БЕЗОПАСНОСТИ

при использовании атомной энергии



ОСНОВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К РАЗРАБОТКЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ УРОВНЯ 1 ДЛЯ БЛОКА АТОМНОЙ СТАНЦИИ ПРИ ИСХОДНЫХ СОБЫТИЯХ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

РБ-123-17

gost.e-ecolog.ru

ФБУ «НТЦ ЯРБ»

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ

УТВЕРЖДЕНО
приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от 1 февраля 2017 г. № 33

РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «ОСНОВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К РАЗРАБОТКЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ УРОВНЯ 1 ДЛЯ БЛОКА АТОМНОЙ СТАНЦИИ ПРИ ИСХОДНЫХ СОБЫТИЯХ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ» (РБ-123-17)

Введено в действие
с 1 февраля 2017 г.

Москва 2017

Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Основные рекомендации к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для блока атомной станции при исходных событиях, обусловленных сейсмическими воздействиями»

(РБ-123-17)

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2017

Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Основные рекомендации к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для блока атомной станции при исходных событиях, обусловленных сейсмическими воздействиями» (РБ-123-17) (далее – Руководство по безопасности) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в целях содействия соблюдению требований пунктов 3.12, 6.1.5, 6.1.8 федеральных норм и правил в области использовании атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла» (НП-016-05), утвержденных постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2005 г. № 11, и пунктов 1.2.9, 1.2.17 федеральных норм и правил в области использовании атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522.

Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (далее – Ростехнадзор) по выполнению ВАБ при исходных событиях, обусловленных сейсмическими воздействиями, проектируемых, сооружаемых и действующих энергоблоков АС с реакторами различных типов.

Рекомендации настоящего Руководства по безопасности относятся к целям, объему, составу, содержанию, последовательности выполнения, обеспечению качества, содержанию отдельных задач (разделов) и содержанию представляемой документации по ВАБ при исходных событиях, обусловленных сейсмическими воздействиями.

Руководство по безопасности предназначено для использования: 1) Эксплуатирующей организацией при обосновании безопасности блоков АС, 2) Ростехнадзором при проведении экспертизы документов, обосновывающих безопасность блоков АС.

Выпускается впервые[1]

---

[1] Разработано коллективом авторов в составе Г.И. Самохин, Д.Е. Носков, Т.В. Берг, В.А. Бредова, М.А. Нажитков, Е.Г. Бугаев (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), И.В. Калинкин (АО «Атомэнергопроект»).

I. Общие положения

1. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Основные рекомендации к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для блока атомной станции при исходных событиях, обусловленных сейсмическими воздействиями» (РБ-123-17) (далее – Руководство по безопасности) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии», в целях содействия соблюдению требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522, а также в целях содействия соблюдению требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Основные требования к вероятностному анализу безопасности блока атомных станций» (НП-095-15), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12 августа 2015 г. № 311.

2. Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору по разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для блока атомной станции при исходных событиях, обусловленных сейсмическими воздействиями (далее – ВАБ сейсмических воздействий).

Список сокращений, используемых в настоящем Руководстве по безопасности, приведен в приложении № 1, термины и определения – в приложении № 2, рекомендуемый состав отчета по ВАБ сейсмических воздействий – в приложении № 3, рекомендуемая последовательность и взаимосвязь задач ВАБ сейсмических воздействий – в приложении № 4, рекомендуемые подходы по вероятностному анализу сейсмической опасности – в приложении № 5, рекомендуемые подходы для проведения вероятностного анализа сейсмической повреждаемости элементов – в приложении № 6, рекомендуемые подходы к анализу систем, суммарной вероятности тяжелых аварий от сейсмических воздей-

ствий и оценке неопределенности – в приложении № 7, примеры критериев исключения элементов – в приложении № 8 к настоящему Руководству по безопасности.

3. Руководство по безопасности содержит рекомендации, выполнение которых обеспечивает приемлемый уровень качества ВАБ сейсмических воздействий.

4. Настоящее Руководство по безопасности предназначено для использования проектными организациями, эксплуатирующей организацией и Ростехнадзором при сооружении и эксплуатации блоков АС, осуществлении надзора за безопасностью блоков АС, разработке и реализации мероприятий по обеспечению безопасности блоков АС.

5. ВАБ сейсмических воздействий является составной частью полномасштабного ВАБ уровня 1, разрабатываемого для всех категорий ИС и для всех возможных эксплуатационных состояний проектируемых, сооружаемых и эксплуатируемых блоков АС с реакторами различных типов.

6. ВАБ сейсмических воздействий может быть выполнен с использованием иных методов, чем те, которые содержатся в настоящем Руководстве по безопасности, при их обоснованности для обеспечения безопасности.

7. Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации по целям, объему, составу, содержанию и последовательности выполнения отдельных задач, а также содержанию и объему отчетной документации.

II. Общие сведения

8. Основными целями ВАБ сейсмических воздействий являются:

оценка вероятности тяжелых аварий для блока АС, обусловленной сейсмическими воздействиями;

оценка граничной сейсмостойкости блока АС как характеристики устойчивости к сейсмическим воздействиям, превышающим МРЗ;

выявление на блоке АС недостатков, в том числе при превышении сейсмическим воздействием уровня МРЗ, и формирование рекомендаций по преодолению указанных недостатков.

9. Основными задачами ВАБ сейсмических воздействий являются:

сбор информации, специфической для блока АС;

вероятностный анализ сейсмической опасности площадки АС;

предварительный анализ сейсмических воздействий, разработка перечня систем (элементов) для анализа;

вероятностный анализ реакции зданий (сооружений) на сейсмические воздействия;

сейсмический обход блока;

анализ сейсмической повреждаемости элементов при сейсмических воздействиях;

анализ надежности персонала;

моделирование аварийных последовательностей;

анализ систем;

анализ неопределенностей, чувствительности, значимости;

анализ результатов ВАБ сейсмических воздействий и оценка уровня безопасности блока АС.

10. ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется выполнять для сооружаемых и эксплуатируемых блоков АС. Рекомендуемая последовательность и взаимосвязь задач ВАБ сейсмических воздействий приведена в приложении № 4 к настоящему Руководству по безопасности.

На стадии сооружения блока АС:

задачу ВАБ сейсмических воздействий «Вероятностный анализ сейсмической опасности» рекомендуется выполнять с использованием упрощенного подхода, приведенного в приложении № 5 к настоящему Руководству по безопасности;

задачу ВАБ сейсмических воздействий «Сейсмический обход блока» рекомендуется не выполнять;

при выполнении задачи ВАБ сейсмических воздействий «Анализ сейсмической повреждаемости элементов при сейсмических воздействиях» рекомендуется использовать результаты расчетного обоснования сейсмостойкости оборудования и зданий (сооружений), выполненных для прототипов блока АС, сведения из обобщенных баз данных и экспертные оценки.

11. ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется разраба-

тывать на основе сведений из отчетов по обоснованию безопасности блока АС и ВАБ блока АС уровня 1 для внутренних ИС.

12. Рекомендации Положения об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для внутренних инициирующих событий для всех режимов работы энергоблока атомной станции, утвержденного приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 9 сентября 2011 г. № 519 (далее – РБ-024-11), распространяются на выполнение ВАБ сейсмических воздействий в части, не противоречащей рекомендациям настоящего Руководства по безопасности.

Рекомендации руководства по безопасности «Основные рекомендации к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 блока атомной станций для инициирующих событий, обусловленных внутриплощадочными пожарами и затоплениями» (РБ-076-12), утвержденного приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 5 сентября 2012 г. № 496, распространяются на выполнение ВАБ сейсмических воздействий в части, не противоречащей рекомендациям настоящего Руководства по безопасности.

Рекомендации руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Основные рекомендации к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для блока атомной станции при инициирующих событиях, обусловленных внешними воздействиями природного и техногенного происхождения» (РБ-021-14), утвержденного приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28 августа 2014 г. № 396, распространяются на выполнение ВАБ сейсмических воздействий в части, не противоречащей рекомендациям настоящего Руководства по безопасности.

13. Рекомендуется устанавливать возможность совместного воздействия на блок АС сейсмических воздействий и иных внешних воздействий, обусловленных сейсмическими воздействиями (например, пожара, затоплений, падения крана и других воздействий, возникающих вследствие сейсмических воздействий).

14. ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется разрабатывать для следующих ИР:

ядерное топливо в активной зоне реактора;

ядерное топливо в местах хранения отработавшего топлива (например,
в бассейне выдержки/перегрузки, барабане отработавших сборок).

15. При выполнении ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется обосновывать интервал времени достижения контролируемого состояния систем (элементов) блока АС после ИС в результате сейсмических воздействий.

III. Сбор информации, специфической для блока атомной станции

16. При выполнении данной задачи ВАБ сейсмических воздействий определяются состав и объем необходимой для анализа информации, а также осуществляется сбор информации. Рекомендуется собирать следующие сведения:

генеральный план площадки АС;

результаты оценки глобальной сейсмической опасности в применении к рассматриваемому региону площадки;

каталоги землетрясений для площадки (района) размещения АС;

ранее выполненные работы по анализу сейсмической опасности площадки, геологические, сейсмотектонические, сейсмологические характеристики региона: структура и расположение зон ВОЗ, сейсмических источников, используемые модели законов затухания;

результаты анализа сейсмичности площадки по геодинамическим данным;

данные о грунтовых основаниях зданий и сооружений площадки, включая геологические, геотехнические, динамические характеристики составляющих грунтового основания, результаты испытаний и результаты исследований устойчивости грунтовых оснований;

мониторинговые исследования записей слабых землетрясений, кренов и осадок оснований площадок и анализ компенсирующих их мероприятий;

базы данных по характеристикам сейсмостойкости блоков прототипов и результаты их сейсмического обхода.

17. При выполнении ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется использовать:

проектную документацию;

эксплуатационную документацию;

опыт эксплуатации для всех блоков анализируемой АС, а также опыт эксплуатации прототипов, включая информацию о произошедших сейсмических воздействиях;

ВАБ сейсмических воздействий, выполненных для прототипов блоков АС;

ВАБ блока АС уровня 1 для внутренних ИС;

существующие исследования по обоснованию безопасности блока АС при сейсмических воздействиях;

поверочные расчеты на сейсмические воздействия оборудования, строительных конструкций, включая опорные, анкерные и фундаментные конструкции оборудования, важного для безопасности;

программы и результаты испытаний на сейсмостойкость оборудования из сейсмического списка оборудования;

3D-модели зданий блока АС (при наличии);

отчеты по обоснованию безопасности блока АС;

методические рекомендации, соответствующие современному уровню развития науки, техники и производства, например, содержащиеся в документах МАГАТЭ и документах других организаций.

IV. Вероятностный анализ сейсмической опасности площадки атомной станции

18. Назначением задачи ВАБ «Вероятностный анализ сейсмической опасности площадки АС» является определение кривых сейсмической опасности, которые предоставляют информацию о частотах превышения сейсмических воздействий различной интенсивности площадки АС.

19. Для определения частот превышения сейсмических воздействий различной интенсивности рекомендуется использовать сейсмотектоническую модель района площадки АС, разработанную в составе проекта АС (или в составе других работ) по определению сейсмичности района и площадки, содержащую результаты обработки геологической, геофизической,

геотехнической и сейсмологической информации, резуль-таты сейсмического и геодинамического мониторингов, прово-димых в периоды проектно-изыскательских работ, строительства и эксплуатации АС.

В сейсмотектоническую модель района площадки АС рекомендуется включать следующие компоненты:

геометрические модели источников сейсмических воздействий (точечные, линейные, площадные, объемные);

законы повторяемости землетрясений (стохастические модели) для источников сейсмических воздействий, включая оценки максимальных магнитуд;

законы затухания интенсивности воздействия в зависимости от расстояния.

20. Вероятностный анализ сейсмической опасности рекомендуется выполнять с учетом локальных грунтовых условий площадки АС. Рекомендуется учитывать влияние динамических характеристик грунтового основания, включая изменение свойств обводненных грунтовых слоев, на результаты анализа сейсмической опасности.

21. Для определения кривых сейсмической опасности рекомендуется определять минимальное значение частоты сейсмических воздействий (на интервале времени, равном одному году) с учетом суммарной вероятности тяжелых запроектных аварий, рассчитанной при разработке ВАБ уровня 1 для внутренних ИС.

22. Рекомендуется выполнять анализ неопределенности оценок сейсмической опасности площадки АС. Рекомендуется учитывать следующие источники неопределенности:

различные модели законов затухания параметров интенсивности воздействий от источников;

различные оценки максимальных магнитуд воздействий;

различные виды подвижек в очаге сейсмического воздействия (сброс, взброс, сдвиг, смешанные воздействия);

различные статистические законы возникновения событий;

другие источники эпистемической неопределенности.

Анализ неопределенности рекомендуется выполнять с использованием логического дерева, которое позволяет получить

кривые сейсмической опасности для различных квантилей. Неопределенность, источники которой перечислены в абзацах 2 – 6 пункта 22 настоящего Руководства по безопасности, оценивается путем построения логического дерева, фрагмент которого для примера представлен на рис. 6.2 приложения № 5 к настоящему Руководству по безопасности.

23. Результаты вероятностного анализа сейсмической опасности площадки АС рекомендуется представлять в виде кривых сейсмической опасности для квантилей спектральных ускорений различных периодов колебаний вплоть до нулевого периода.

24. Результаты вероятностного анализа сейсмической опасности площадки АС рекомендуется представлять в виде кривых сейсмической опасности для квантилей максимальных ускорений нулевого периода с указанием формы спектра ответа, соответствующей каждому уровню повторяемости (годовой частоте) этих кривых.

25. Рекомендуемые подходы для выполнения вероятностного анализа сейсмической опасности площадки АС приведены в приложении № 5 к настоящему Руководству по безопасности.

V. Предварительный анализ исходных событий для сейсмических воздействий. Разработка перечня систем (элементов) для анализа

26. Предварительный анализ ИС для сейсмических воздействий различной интенсивности выполняется для:

выявления ИС, обусловленных сейсмическими воздействиями;

разработки моделей аварийных последовательностей при сейсмических воздействиях;

разработки предварительного перечня систем (элементов), потенциально подверженных сейсмическим воздействиям.

Результатом предварительного анализа ИС для сейсмических воздействий является перечень ИС, а также дерево сейсмических ИС, определяющее взаимосвязи между различными сейсмическими ИС и отказами зданий, систем и оборудования. Пример дерева сейсмических ИС приведен в приложении № 7 к настоящему Руководству по безопасности.

27. Перечень систем (элементов) в ВАБ сейсмических воздействий (далее – сейсмический перечень элементов) разрабатывается для учета их отказов при моделировании аварийных последовательностей для ИС, обусловленных сейсмическими воздействиями.

28. Сейсмический перечень элементов рекомендуется разрабатывать поэтапно, учитывая сведения из:

результатов анализа генерального плана площадки расположения блока АС;

анализа устойчивости грунтовых оснований площадки расположения блока АС;

модели ВАБ для внутренних ИС;

результатов сейсмического обхода блока АС;

анализа повреждаемости элементов перечня при сейсмическом воздействии.

29. В сейсмический перечень элементов рекомендуется включить:

все элементы, учитываемые в модели ВАБ для внутренних ИС;

пассивные элементы технологических систем, не включенные по различным причинам в модель ВАБ для внутренних ИС, отказ которых при сейсмическом воздействии может оказать влияние на выполнение функций безопасности, которые учитываются в ВАБ (баки, теплообменники, емкости, элементы распределительных систем);

пассивные строительные конструкции, элементы крепления, обеспечивающие удержание других элементов из сейсмического перечня элементов в проектном положении;

здания и сооружения, в которых расположены системы (элементы), включенные в модель ВАБ для внутренних ИС;

гидротехнические сооружения и элементы, повреждения которых из-за сейсмического воздействия могут привести к затоплению площадки АС или нарушениям в работе систем отвода тепла к конечному поглотителю;

другие элементы, включаемые в перечень по результатам выполнения сейсмического обхода блока АС, повреждение которых из-за сейсмического воздействия может привести к сейсмическим пространственным взаимодействиям с другими элементами из сейсмического перечня элементов.

30. Исключение элементов из предварительного сейсмического перечня рекомендуется выполнять с целью формирования окончательного перечня элементов. Исключение элементов из предварительного перечня рекомендуется выполнять:

по результатам сейсмического обхода блока на основании выполненных упрощенных оценок граничной сейсмостойкости;

на основании оценок граничной сейсмостойкости элементов из предварительного сейсмического перечня, с применением имеющихся в проекте расчетов;

на основании сходства с элементами обобщенных баз данных, для которых известна нижняя оценка граничной сейсмостойкости элемента;

на основании выполненных оценок сейсмической повреждаемости элементов из сейсмического перечня элементов.

31. Сейсмический перечень элементов рекомендуется представлять в табличном виде с указанием следующих сведений:

порядковый номер элемента в таблице;

наименование элемента;

принадлежность к технологической системе;

кодовое обозначение элемента в проекте АС;

здание, в котором расположен элемент;

помещение, в котором расположен элемент;

высотная отметка;

категория сейсмостойкости в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии «Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций» (НП-031-01), утвержденными постановлением Госатомнадзора России от 19 октября 2001 г. № 9 (далее – НП-031-91);

расположение оси элемента (если для элемента ось может быть определена) относительно осей здания.

Перечень зданий и сооружений рекомендуется представлять в отдельной таблице с указанием следующих сведений:

порядковый номер здания (сооружения) в таблице;
наименование здания (сооружения);
кодовое обозначение здания в проекте АС;
номер элемента на схеме генерального плана АС.

VI. Вероятностный анализ реакции зданий (сооружений) на сейсмические воздействия

32. Вероятностный анализ реакции зданий (сооружений) на сейсмические воздействия рекомендуется выполнять для определения нагрузок на элементы из сейсмического перечня элементов в форме значений средних и стандартных отклонений сейсмических усилий и/или спектров ответа. Для этого рекомендуется разрабатывать реалистичные механические модели сооружений совместно с грунтовыми основаниями и выполнять динамические расчеты, учитывающие механическое взаимодействие грунтового основания и сооружения при сейсмическом воздействии.

33. При выполнении анализа реакции сооружений сейсмические воздействия (например, акселерограммы) для анализа рекомендуется определять с учетом локальных свойств грунтовых оснований (толщин и последовательности расположения слоев грунта и их динамических характеристик).

34. При выполнении динамических расчетов системы «грунт-сооружение» рекомендуется учитывать средние значения и характеристики алеаторной и эпистемической неопределенности для:

механических динамических характеристик сооружения и грунтового основания (жесткостных, инерционных, демпфирующих);

геометрических кинематических и силовых характеристик входного сейсмического воздействия (входных спектров ответа на свободной поверхности, фазового состава воздействия).

35. Динамические расчеты системы «основание-сооружение» рекомендуется выполнять одним из следующих методов:

прямой динамический метод интегрирования связанной системы дифференциальных уравнений движения;

динамический метод модальной суперпозиции;

динамический метод комплексных функций интегральных преобразований.

36. Средние значения характеристик реакции здания (сооружения) и их стандартные отклонения рекомендуется определять одним из перечисленных ниже методов при сейсмическом воздействии повторяемостью 10^{-4} 1/год по средней кривой сейсмической опасности (для среднего спектра ответа равной частоты превышения 10^{-4} 1/год):

статистическое моделирование с применением метода «Монте-Карло» и его вариантов при варьировании параметров, указанных в пункте 34 настоящего Руководства по безопасности, и выполнение динамических расчетов системы «грунт-сооружение»;

выполнение детерминистического анализа реакции системы «грунт-сооружение» при реалистичных значениях параметров модели с последующей оценкой каждого из факторов, указанных в пункте 34 настоящего Руководства по безопасности, влияющих на отклонение от полученного значения реакции и общего отклонения в целом;

масштабирование существующих в проекте блока АС расчетов системы «грунт-сооружение» с целью учета отличия характеристик реакции от средних значений и обоснованное присвоение характеристикам отклонения значений, полученных из опыта выполнения расчетов по двум предыдущим моделям.

Выбор метода анализа реакции зданий (сооружений) рекомендуется выполнять в зависимости от наличия исходных данных и метода, выбранного для оценки характеристик повреждаемости элементов, указанных в разделе VIII настоящего Руководства по безопасности.

VII. Сейсмический обход блока

37. Сейсмический обход блока действующей АС или АС, находящейся на этапе ввода в эксплуатацию, рекомендуется выполнять для подтверждения имеющейся в проекте блока АС и получения дополнительной информации:

о точном расположении элемента на площадке (здания, помещения, высотной отметки, ориентации в осях здания);

о соответствии рассматриваемых элементов требованиям конструкторской документации в части достаточности условий закрепления элементов при монтаже и эксплуатации, о состоянии фиксирующих конструкций, о состоянии примыкающих элементов распределительных систем (трубопроводов, кабелей, воздуховодов);

о возможных сейсмических пространственных взаимодействиях элемента с близко расположенным оборудованием и строительными конструкциями.

При выполнении сейсмического обхода блока АС производится сбор дополнительной информации для выполнения анализа повреждаемости элементов из сейсмического перечня элементов.

38. Для выполнения процедур обхода блока АС рекомендуется формировать группы обхода блока. В группы обхода блока рекомендуется включать:

специалистов по ВАБ;

специалистов по анализу повреждаемости из-за сейсмических воздействий элементов;

персонал блока АС.

39. Процедуру сейсмического обхода блока рекомендуется выполнять в три этапа:

этап 1 – анализ технической документации (технологических схем, деревьев отказов из ВАБ для внутренних ИС, сейсмического перечня элементов, имеющихся расчетов нагрузок, спектров ответа, расчетов на прочность и сейсмостойкость, результатов испытаний на сейсмостойкость, технических условий на оборудование) и подготовка протоколов обхода; на этапе 1 рекомендуется формировать группы обхода блока;

этап 2 – обход и обследование площадки, зданий, сооружений и помещений блока АС; документирование результатов – заполнение протоколов обхода, фотографирование, составление эскизов, расчетных схем;

этап 3 – формирование базы данных о сейсмических элементах на основе результатов обходов.

40. В протоколы обходов помещений рекомендуется включать следующие сведения:

наименование и маркировку здания, помещения, высотную отметку, наименование системы, элемента, принадлежность к классу сейсмостойкости;

информацию, характеризующую элементы из сейсмического перечня о состоянии анкерных, фиксирующих элементов, сварных швов приварки к закладным деталям, состоянии резьбовых соединений, опор, подвесок, лотков распределительных систем;

информацию, характеризующую возможные отказы элемента вследствие сейсмического взаимодействия с:

элементами строительных конструкций и другими элементами вследствие близости расположения (ударное воздействие, падение);

распределительными системами (кабели, трубопроводы, воздуховоды) по причине недостаточной их раскрепленности;

сосудами, баками, корпусным оборудованием, повреждение которых при сейсмическом воздействии приводит к отказу элемента по причине затопления;

графические материалы (рисунки, эскизы, фотографии), дополняющие сведения, включенные в протоколы обхода помещений.

VIII. Анализ сейсмической повреждаемости элементов при сейсмических воздействиях

41. Целью оценки сейсмической повреждаемости элементов при сейсмических воздействиях является оценка условных вероятностей отказа элемента в зависимости от интенсивности сейсмического воздействия на свободной поверхности грунта площадки (максимального или спектрального (для фиксированного диапазона частот) ускорения) для различных уровней доверительной вероятности. Параметр интенсивности сейсмических воздействий рекомендуется выбирать соответствующим тому, который использовался для представления результатов вероятностного анализа сейсмической опасности площадки АС.

42. Анализ сейсмической повреждаемости элемента рекомендуется выполнять в несколько этапов:

этап 1 – выбор критериев (видов) отказа элемента;

этап 2 – оценка характеристик сейсмической повреждаемости элемента для каждого выбранного вида отказа;

этап 3 – построение кривых сейсмической повреждаемости элемента.

43. Рекомендуется рассматривать следующие виды отказов элемента:

функциональные отказы в области упругости (ложные срабатывания реле и выключателей, заклинивание приводов, упругая потеря устойчивости стенок сосудов, чрезмерный прогиб лопастей вентиляторов, чрезмерное взаимное смещение опор, расположенных на строительной конструкции);

хрупкие отказы (отрыв и срез анкерных болтов и шпилек, разрыв по сварному соединению);

отказы, обусловленные достижением предельных состояний по условиям пластичности (достижение пластического момента в сечениях трубопроводов, корпусов, пластические деформации кабельных лотков и стеллажей).

44. При выборе критериев отказа рекомендуется руководствоваться проектными критериями, результатами испытаний на сейсмостойкость, отказами аналогичных элементов, выявленными после прошедших землетрясений.

45. Рекомендуемые подходы для проведения вероятностного анализа сейсмической повреждаемости элементов приведены в приложении № 6 к настоящему Руководству по безопасности.

Для выявления элементов, которые вносят основной вклад в характеристики сейсмической безопасности блока АС, рекомендуется исключать элементы, влияние которых незначительно. Для исключения элементов, незначительно влияющих на характеристики сейсмической безопасности блока, рекомендуется разрабатывать критерии исключения элементов в соответствии с их характеристиками граничной сейсмостойкости. Рекомендуется формировать перечень элементов, исключенных в соответствии с принятыми критериями. Примеры критериев исключения элементов приведены в приложении № 8 к настоящему Руководству по безопасности.

IX. Анализ надежности персонала

46. Целью АНП в ВАБ сейсмических воздействий является определение и оценка влияния на персонал различных факторов сейсмических воздействий при выполнении им действий по управлению аварией (повышенный уровень стресса, сокращение времени на выполнение действия, ложная сигнализация, потеря информации на БПУ).

47. АНП при выполнении ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется проводить методом, аналогичным методу, использованному при выполнении ВАБ АС уровня 1 для внутренних ИС, с учетом сейсмических воздействий.

48. В качестве базового перечня ошибочных действий персонала рекомендуется принимать перечень, разработанный в рамках ВАБ АС уровня 1 для внутренних ИС. При выявлении дополнительных аварийных сценариев в ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется выявлять новые ошибочные действия персонала и оценивать их вероятности.

49. Факторы, влияющие на вероятность ошибок персонала при управлении аварией, учитываемые в ВАБ АС уровня 1 для внутренних ИС, следует использовать в качестве базового перечня факторов при выполнении ВАБ сейсмических воздействий.

50. При выполнении АНП рекомендуется учитывать дополнительные факторы, обусловленные сейсмическими воздействиями и влияющие на вероятность выполнения персоналом действий по управлению аварией. Рекомендуется учитывать следующие факторы влияния на невыполнение персоналом необходимых действий:

повышенный стресс;

уменьшение времени на выполнение действия;

невозможность выполнения действия по месту из-за возникновения условий, препятствующих выполнению действия;

снижение информационного обеспечения на БПУ.

X. Анализ систем и моделирование аварийных последовательностей

51. Модель аварийных последовательностей ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется разрабатывать на

основе имеющихся моделей аварийных последовательностей из ВАБ для внутренних ИС. В качестве основы разрабатываемой модели ВАБ рекомендуется использовать деревья событий и деревья отказов из модели ВАБ для внутренних ИС, включая в них при необходимости дополнительные события и/или изменения в моделях систем, связанные с зависимыми отказами в системах вследствие сейсмического воздействия. При этом рекомендуется учитывать, что виды и последствия отказов при различных уровнях сейсмического воздействия могут быть различными и для одних и тех же элементов отличаться от рассматриваемых в ВАБ для внутренних ИС.

52. В вероятностную модель рекомендуется включать элементы из окончательного сейсмического перечня элементов.

53. Рекомендуется рассматривать различные уровни сейсмического воздействия в соответствии с кривой сейсмической опасности, которые могут оказать влияние на суммарную вероятность тяжелых аварий с плавлением топлива. Учет различных уровней сейсмического воздействия рекомендуется осуществлять наложением конкретных граничных условий.

54. Использование моделей АП, разработанных в ВАБ АС уровня 1 для внутренних ИС, может быть невозможным при разработке сценариев сейсмических воздействий из-за необходимости учета специфики последствий сейсмических воздействий (множественных отказов и ложных срабатываний). В этих случаях рекомендуется разрабатывать новые модели АП при условии сохранения принципов моделирования и основных допущений, принятых при выполнении ВАБ АС уровня 1 для внутренних ИС.

55. Рекомендуется в моделях АП и систем для сейсмических воздействий учитывать как отказы систем (элементов), вызванные сейсмическими воздействиями, так и отказы из модели ВАБ для внутренних ИС, причиной которых не являются сейсмические воздействия. При этом рекомендуется учитывать отказы пассивных элементов (например, трубопроводов, воздуховодов, кабельных трасс, баков, строительных элементов).

Учет указанных пассивных элементов в вероятностных моделях систем рекомендуется обосновывать.

56. С целью выявления ИС, обусловленных сейсмическим воздействием, рекомендуется разрабатывать сейсмические деревья событий на этапах предварительного анализа сейсмических событий и этапе моделирования АП.

57. Рекомендуется учитывать логическую причинно-следственную связь событий, связанных с развитием сценария сейсмического воздействия, и вносить необходимые изменения в модель ВАБ сейсмических воздействий. Рекомендуется учитывать, что при достижении сейсмическим воздействием предусмотренного проектом уровня останов блока должен быть выполнен по сигналу сейсмозащиты.

58. При моделировании АП рекомендуется учитывать, что последствием сейсмических воздействий большой интенсивности может быть затруднение доступа персонала в отдельные зоны АС для возможности управления аварией.

59. Рекомендуется учитывать отличие в вероятностях восстановления элементов моделей внутренних и внешних воздействий. Для сейсмических воздействий интенсивности МРЗ и выше возможность восстановления для элемента может быть снижена или отсутствовать. Рекомендуется оценивать вероятность восстановления систем (элементов) с учетом интенсивности сейсмических воздействий.

60.При моделировании АП рекомендуется учитывать зависимость отказов элементов вследствие одновременного сейсмического воздействия на эти элементы при расположении их на одинаковых или близких высотных отметках, строительных осях и ориентации в одном и том же направлении. При построении вероятностной модели указанные зависимости следует учитывать моделированием отказов элементов по общей причине, обусловленных сейсмическим воздействием.

61. В анализе АП рекомендуется интегрировано учитывать характеристики сейсмической опасности площадки АС и характеристики условных вероятностей отказа (повреждаемости) в диапазоне сейсмических воздействий различной интенсивности и

частоты, определенном вероятностным анализом сейсмической опасности площадки АС.

62. Для определения средней вероятности тяжелых аварий, обусловленной сейсмическими воздействиями, рекомендуется для элементов вероятностной модели блока АС использовать средние значения сейсмической повреждаемости и средние характеристики сейсмической опасности площадки (средние кривые сейсмической опасности, средние спектры равной частоты превышения). В качестве вероятностного показателя безопасности, оцениваемого в рамках ВАБ сейсмических воздействий, рекомендуется использовать среднее значение суммарной (по всем сейсмическим воздействиям) вероятности тяжелых аварий за один год для одного блока АС.

XI. Анализ неопределенности, чувствительности, значимости результатов ВАБ сейсмических воздействий и оценка уровня безопасности блока АС

63. Анализ неопределенности, чувствительности и значимости на этапе выполнения отдельных задач ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется выполнять в соответствии с рекомендациями из РБ-024-11.

64. Анализ результатов ВАБ сейсмических воздействий и оценку уровня безопасности блока АС рекомендуется выполнять в соответствии с рекомендациями из РБ-024-11.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 1
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Основные рекомендации к разработке
вероятностного анализа безопасности уровня
1 для блока атомной станции при исходных
событиях, обусловленных сейсмическими
воздействиями», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от 1 февраля 2017 г. № 33

Список сокращений

АЗ	–	аварийная защита
АНП	–	анализ надежности персонала
АП	–	аварийная последовательность
АС	–	атомная станция
БПУ	–	блочный пункт управлении
ВАБ	–	вероятностный анализ безопасности
ВОЗ	–	возможный очаг землетрясений
ВОП	–	вероятность ошибки персонала
ИР	–	источник радиоактивности
ИС	–	исходное событие
ЛЭП	–	линия электропередач
МАГАТЭ	–	Международное агентство по использованию атомной энергии
МРЗ	–	максимальное расчетное землетрясение
НЭ	–	нормальная эксплуатация
ОП	–	ошибка персонала
ОРУ	–	открытое распределительное устройство
ПЗ	–	проектное землетрясение
РДЭС	–	резервная дизель-электрическая станция

ПРИЛОЖЕНИЕ № 2
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Основные рекомендации к разработке
вероятностного анализа безопасности
уровня 1 для блока атомной станции при
исходных событиях, обусловленных
сейсмическими воздействиями»,
утвержденному приказом Федеральной
службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от 1 февраля 2017 г. № 33

Термины и определения

Акселерограмма – зависимость ускорения колебаний от времени.

Акселерограмма аналоговая (подобранная) – акселерограмма, зарегистрированная при реальном землетрясении и принятая для расчета на сейсмостойкость с учетом ее соответствия сейсмотектоническим и грунтовым условиям площадки АС.

Акселерограмма землетрясения – акселерограмма на свободной поверхности грунта при землетрясении.

Акселерограмма ответная – акселерограмма конструкции, определяемая из расчета вынужденных колебаний при сейсмическом воздействии.

Акселерограмма поэтажная – ответная акселерограмма для отдельных высотных отметок сооружения, на которых установлено оборудование.

Акселерограмма синтезированная – акселерограмма, полученная аналитическим путем на основе статистической обработки и анализа ряда акселерограмм и (или) спектров реальных землетрясений с учетом местных сейсмических условий.

Алеаторный разброс (неопределенность), β_R – разброс значений параметра явления вследствие его случайной (стохастической) природы. Алеаторный разброс учитывается моделированием параметра как случайной величины в вероятностной модели. В большинстве случаев алеаторный разброс не может быть уменьшен путем сбора дополнительных данных (проведения дополнительных испытаний материала), получения дополнительной информации.

Анализ реакции площадки – определение движений грунта при землетрясении с учетом местных условий грунта, с помощью теории распространения плоских волн. Профиль грунта моделируется как столб грунта конечной глубины с бесконечным простиранием в горизонтальных направлениях. Волны землетрясения распространяются вверх по столбу

грунта, определяя движения грунта на поверхности.

Анализ сейсмической повреждаемости элементов – процедура определения видов отказа и кривых сейсмической повреждаемости для сейсмического перечня элементов.

Вероятностный анализ сейсмической опасности – вероятностный метод, сочетающий альтернативные модели очагов, периоды повторяемости и зависимости затухания сильного движения, а также явные и случайные неопределенности в вероятностной модели сейсмической опасности для получения вероятности превышения конкретного уровня движения грунта.

Вероятность условная (в анализе повреждаемости) – вероятность рассматриваемого события в зависимости (при условии) от достижения фиксированного значения максимального ускорения свободной поверхности грунта a в долях ускорения свободного падения g – $P(a)$. Вместо ускорения a могут также использоваться другие характеристики интенсивности воздействия на свободной поверхности грунта.

Взаимодействие системы грунт-сооружение – механическое взаимодействие строительных конструкций сооружения с грунтовым основанием этого сооружения при внешнем воздействии, с учетом распространяющихся падающих и отражающихся сейсмических волн или внешних ударных воздействий на сооружение.

Граничная сейсмостойкость (HCLPF) элемента – значение ускорения (в долях ускорения свободного падения g) на свободной поверхности грунта, при котором условная вероятность отказа элемента не превышает 5 % с доверительной вероятностью, равной 95 %. Для средней кривой сейсмической повреждаемости, при комбинированной неопределенности в пределах 0,5 значение ускорения граничной сейсмостойкости приблизительно соответствует сейсмической повреждаемости, равной 0,01 (1 %).

Граничная сейсмостойкость блока АС – значение ускорения (в долях ускорения свободного падения g) на свободной поверхности грунта, при котором оцененное среднее значение условной вероятности тяжелого повреждения активной зоны не превышает 1 %.

Движение свободной поверхности площадки – движение грунта, происходящее непосредственно на свободной поверхности или вблизи поверхности на конкретной площадке при отсутствии сооружения (строительного объекта). Определяется по анализу реакции площадки на сейсмическое воздействие.

Деагрегация – расчет наиболее вероятных магнитуд землетрясений и расстояний от очага до площадки, преобладающих в вероятностном анализе сейсмической опасности при данном периоде повторяемости и периоде колебаний.

Демпфирование (затухание) вязкое – вид демпфирования, которое возникает при движении тела в вязкой среде. При вязком демпфировании сила сопротивления среды пропорциональна скорости колеблющегося тела.

Демпфирование конструкционное, материальное, гистерезисное – вид демпфирования, при котором рассеивание энергии происходит за счет сил внутреннего трения.

Дерево событий сейсмическое – граф, отображающий логику развития сейсмического воздействия определенной интенсивности, используемый для моделирования возникновения сейсмических ИС.

Закон затухания интенсивности воздействия от расстояния до очага – зависимость бальности, величин максимального или спектральных ускорений (для разных периодов колебаний) от характерного расстояния до очага землетрясения. В качестве параметров закон может содержать характеристики подвижки в очаге грунтового основания площадки.

Закон повторяемости землетрясений – линейная зависимость логарифма числа землетрясений в определенном районе за определенный промежуток времени от магнитуды.

Зона ВОЗ – зона возникновения очагов землетрясений.

Исходное событие сейсмическое – исходное событие, вызванное сейсмическим воздействием.

Коэффициент вязкого демпфирования – коэффициент пропорциональности между силой вязкого сопротивления среды и скоростью движения тела.

Коэффициент демпфирования (доля, процент от критического) – отношение текущей величины коэффициента демпфирования осциллятора с вязким демпфером к критическому значению его коэффициента демпфирования, выраженное в долях или процентах.

Кривая сейсмической опасности (сейсмического риска) – представленное на графике множество значений частот превышения сейсмических воздействий заданной интенсивности в зависимости от принятого параметра интенсивности сейсмического воздействия. В вероятностном анализе кривые сейсмической опасности разрабатываются для различных уровней доверительной вероятности.

Кривая сейсмической повреждаемости – представленные на графике значения условной вероятности отказа элемента в зависимости от ряда значений максимального ускорения свободной поверхности площадки АС (или другого параметра интенсивности, если кривые сейсмической опасности представлены с его помощью).

Кривые сейсмической опасности для квантилей – набор кривых сейсмической опасности, которые используются для выполнения анализа неопределенности в оценках частот и интенсивности событий, которые соответствуют различным уровням доверительной вероятности.

Критическое демпфирование (затухание) – значение коэффициента демпфирования осциллятора с вязким демпфером, при котором колебательный характер его движения меняется на апериодический.

Магнитуда – мера силы землетрясения, связанная с энергией, высвобож-

дающейся в форме сейсмических волн. Магнитуда выражается численной величиной в стандартной шкале (Рихтера, поверхностных волн, моментной магнитуды и т.п.).

Максимальное (пиковое) ускорение земной поверхности – максимальное ускорение акселерограммы, которое реализуется на свободной поверхности грунта при землетрясении.

Метод логического дерева – вероятностный метод учета неопределенностей моделей при моделировании. В этом методе применяется структура из узлов и ветвей в виде дерева, представляющих соответственно точки принятия решений и альтернативные модели. Ветви от каждого узла имеют определенный заданный вес. Сумма весов ветвей каждого узла равна единице. Поиск по логическому дереву выполняется путем исчерпывающей выборки или по вероятностной процедуре для определения статистических рядов.

Очаг землетрясения – объем геологической среды, где происходят разрывы пород и высвобождение упругих напряжений. Размер области очага и величина сбрасываемых упругих напряжений обусловливают энергию сейсмических волн и магнитуду землетрясения. Мерой величины очага является также сейсмический момент – произведение модуля сдвига горных пород на площадь разрыва и амплитуду смещения. Место в очаге, в котором начинается разрыв, называется гипоцентром (фокусом) землетрясения, а его проекция на земную поверхность – эпицентром. По типу смещения пород очаг может быть охарактеризован как сдвиг, сброс, надвиг или более сложная их комбинация.

Разброс (неопределенность) комбинированный, β_c – неопределенность, состоящая из алеаторного (случайного) β_R и эпистемического (модельного) β_U разброса (неопределенности). Мера разброса в виде логарифмически-нормального стандартного отклонения определяется как $\beta_c = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2}$.

Сейсмическая опасность (в вероятностном анализе сейсмической опасности) – представляется в виде ожидаемых (в течение заданного интервала времени) частот превышения сейсмических воздействий различной интенсивности на площадке АС. Интенсивность воздействия характеризуется параметром (максимальным ускорением поверхности грунта, спектральным ускорением поверхности грунта при заданной частоте и коэффициенте демпфирования и т.п.). Период времени обычно задается равным одному году, а оцененная частота называется годовой частотой воздействия.

Сейсмическая повреждаемость элемента (сооружения, оборудования или их составной части) при сейсмическом воздействии заданной интенсивности – условная вероятность отказа элемента при достижении на свободной поверхности грунта заданного уровня интенсивности сейсмического воздействия. Уровень сейсмического воздействия может быть задан спектром ответа (реакции) этого воздействия на свободной поверхности

площадки. Сейсмическая повреждаемость не зависит от сейсмической опасности площадки расположения рассматриваемого объекта, но учитывает спектральный состав воздействия на него.

Сейсмический источник – обобщенный термин, относящийся к доменам (области геологической среды, характеризующиеся внутренней однородностью физических свойств и рассеянной сейсмичностью) и тектоническим структурам (разрывные и складчатые дислокации), которые могут вызвать колебательные движения и тектонические деформации поверхности. В вероятностном анализе сейсмической опасности для сейсмических источников должны быть заданы характеристики частот воздействий в зависимости от магнитуд землетрясений.

Сейсмический обход блока – визуальная проверка, выполняемая в зданиях, сооружениях и на площадке АС, где физически расположены элементы *сейсмического перечня элементов с целью установить*:

соответствие процедурам монтажа и требованиям конструкторской документации, достаточность условий закрепления элементов;

точное расположение элемента на площадке (здание, помещение, высотная отметка, ориентация в осях здания);

возможные сейсмические пространственные взаимодействия.

Сейсмический перечень элементов – перечень элементов АС и грунтовых оснований, для которых необходимо выполнить анализ сейсмической повреждаемости.

Сейсмическое пространственное взаимодействие – механическое взаимодействие оборудования, элементов распределительных систем, строительных конструкций с расположенным вблизи элементом сейсмического списка, в результате чего может произойти отказ этого элемента и невыполнение возложенной на него функции.

Спектр ответа (реакции) – совокупность абсолютных значений максимальных ответных ускорений линейного осциллятора при заданном акселерограммой воздействии с учетом собственной частоты колебаний и параметра демпфирования осциллятора.

Спектр ответа равной частоты превышения – спектр ответа, определяемый таким образом, чтобы частота превышения (в течение заданного интервала времени) спектральной величины (ускорения, скорости, перемещения) была одинаковой для всех значений частоты колебаний (периода колебаний) этого спектра. Период времени обычно задается равным одному году.

Спектральное ускорение – значение ускорения спектра ответа, соответствующее заданной частоте (периоду).

Спектры ответа равных частот превышения для квантилей – набор спектров ответа равных частот превышения с различными уровнями доверительной вероятности, которые используются для выполнения анализа неопределенности в оценках частот и интенсивности событий.

Ускорение нулевого периода – спектральное ускорение в асимптотической (твердотельной) области спектра, которая обычно лежит в диапазоне частот более 33 Гц (максимальное ускорение акселерограммы спектра ответа).

Частота превышения заданной интенсивности сейсмического воздействия на площадке АС – оцененное значение вероятности превышения заданного значения параметра интенсивности сейсмического воздействия на поверхности площадки АС на интервале времени один год.

Эпистемический разброс (неопределенность), β_U – разброс, отражающий неопределенность, связанную с недостаточной изученностью рассматриваемого явления, что препятствует возможности точнее это явление моделировать. Эпистемическая неопределенность присутствует в диапазоне изменения значений параметров, возможности использовать разные модели, уровне детализации при моделировании, различных экспертных оценках и в статистической доверительной вероятности. Эпистемическая неопределенность может быть снижена за счет получения дополнительного объема информации, однако часто это является нецелесообразным вследствие временных, финансовых, технических ограничений.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 3
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Основные рекомендации к разработке
вероятностного анализа безопасности уровня 1
для блока атомной станции при исходных
событиях, обусловленных сейсмическими
воздействиями», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от 1 февраля 2017 г. № 33

Рекомендуемый состав отчета по ВАБ сейсмических воздействий

I. Общие сведения

В главе приводится информация о характеристиках источников радиоактивности, рассматриваемых эксплуатационных состояниях, поставленных целях, объеме исследований и задачах, выполняемых в рамках ВАБ сейсмических воздействий, излагаются основные предположения и ограничения, принятые в анализе.

В данной главе рекомендуется приводить ссылки на экспертные заключения, подтверждающие качество ВАБ АС уровня 1 для внутренних ИС, используемый в качестве основы при выполнении ВАБ сейсмических воздействий.

Рекомендуемая последовательность и взаимосвязь задач ВАБ сейсмических воздействий приведена в приложении № 4 к настоящему Руководству по безопасности. В отчетной документации по ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется приводить детальную информацию о площадке размещения АС, краткую информацию о реакторной установке, контроле и управлении блоком АС, системах основного и аварийного электроснабжения, системах охлаждения основного оборудования и о системах, участвующих в выполнении функций безопасности. Рекомендуется приводить ссылки на соответствующие источники, содержащие более детальную информацию.

В отчетной документации по ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется приводить краткие характеристики методик, руководств и компьютерных программ, используемых для решения всех задач, рассмотренных в рамках ВАБ сейсмических воздействий.

II. Сбор информации, специфической для блока АС

В отчетной документации по ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется представлять все сведения о блоке АС, которые использовались при выполнении ВАБ сейсмических воздействий. Исходные данные реко-

мендуется представлять в объеме, необходимом для обеспечения достоверности и полноты анализа.

При подготовке исходных данных для ВАБ сейсмических воздействий в отчетной документации рекомендуется представлять ссылки на использованную информацию об АС и выполненные анализы, результаты которых использовались при выполнении ВАБ сейсмических воздействий.

III. Вероятностный анализ сейсмической опасности площадки АС

Рекомендуется представлять анализ по сейсмической опасности площадки АС, включая:

каталоги землетрясений региона;

данные исследований по уточнению сейсмотектонических условий территории строительства, устанавливающих местоположение и глубину очагов возможных землетрясений, их магнитуду, повторяемость и минимальное эпицентральное расстояние;

модели зон ВОЗ, геометрические характеристики сейсмических источников;

соотношения затухания, определяющие максимальные магнитуды, варианты соотношений (эпистемическая неопределенность);

законы повторяемости землетрясений для зон ВОЗ;

логические деревья для анализа сейсмической опасности;

результаты анализа сейсмической опасности (кривые сейсмической опасности для максимальных и спектральных ускорений, спектры ответа);

сведения об учете локальных грунтовых условий в характеристиках сейсмической опасности.

IV. Предварительный анализ исходных событий для сейсмических воздействий. Разработка перечня систем (элементов) для анализа

Рекомендуется представлять перечень едениц оборудования, строительных элементов, элементов распределительных систем с указанием:

порядкового номера элемента;

наименования;

принадлежности к технологической системе;

здания;

помещения;

высотной отметки;

категории сейсмостойкости в соответствии с НП-031-01;

расположения оси элемента относительно осей здания.

V. Вероятностный анализ реакции сооружений на сейсмические воздействия

В отчетной документации ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется представлять:

результаты вероятностного анализа сооружений на вероятность возникновения сейсмических воздействий в виде спектров ответа;

модели грунтовых оснований, которые использовались в расчете взаимодействия «грунт-сооружение»;

результаты расчета анализа реакции площадки; сравнение спектральных характеристик воздействий, использованных в проектных обоснованиях и в результате расчета реакции площадки;

сведения о выполненных расчетах по учету вариаций жесткостных и инерционных характеристик.

VI. Сейсмический обход блока

Рекомендуется представлять следующие сведения о сейсмическом обходе блока:

протоколы обходов помещений;

итоговую таблицу с основными результатами обхода (рекомендациями, сведениями о пространственных взаимодействиях, характеристиках граничной сейсмостойкости);

выполненные обоснования граничной сейсмостойкости элементов непрямыми методами (при наличии).

VII. Анализ сейсмической повреждаемости элементов при сейсмических воздействиях

В данной главе рекомендуется представлять следующие сведения о выполненном анализе сейсмической повреждаемости элементов:

метод выполнения анализа сейсмической повреждаемости;

виды и критерии отказов;

критерии исключения;

характеристики сейсмической повреждаемости не исключенных элементов A_m, β_U, β_R, β_c.

VIII. Анализ надежности персонала

В отчетной документации по ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется представлять результаты анализа надежности персонала, включая: краткое описание использованной методики АНП, перечень рассматриваемых ошибок персонала и их идентификаторы, результаты анализа по отбору ошибок персонала, результаты анализа по определению ВОП, результаты анализа по оценке зависимостей ОП.

В отчетной документации по ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется представлять базовый перечень действий персонала и перечень действий, полученный в результате анализа дополнительных сценариев, связанных с сейсмическими воздействиями.

Рекомендуется представлять результаты окончательного АНП для ВАБ сейсмических воздействий с учетом влияния факторов, обусловленных сейсмическим воздействием, на действия персонала.

Рекомендуется представлять результаты оценки вероятностей выполнения действий персоналом, которые используются в ВАБ сейсмических воздействий.

Рекомендуется представлять анализ зависимых ошибок персонала и результаты их оценки.

IX. Моделирование аварийных последовательностей

Рекомендуется представлять результаты моделирования АП включая:

сейсмические деревья событий;

краткую характеристику модели ВАБ для внутренних ИС;

измененные и вновь разработанные деревья событий и деревья отказов для учета сейсмических воздействий различного уровня;

частоты сейсмических ИС и отказов для различных диапазонов воздействий;

результаты моделирования АП, перечень минимальных сечений, вероятность тяжелого повреждения активной зоны для каждого из рассматриваемых ИС.

X. Анализ неопределенности, чувствительности и значимости

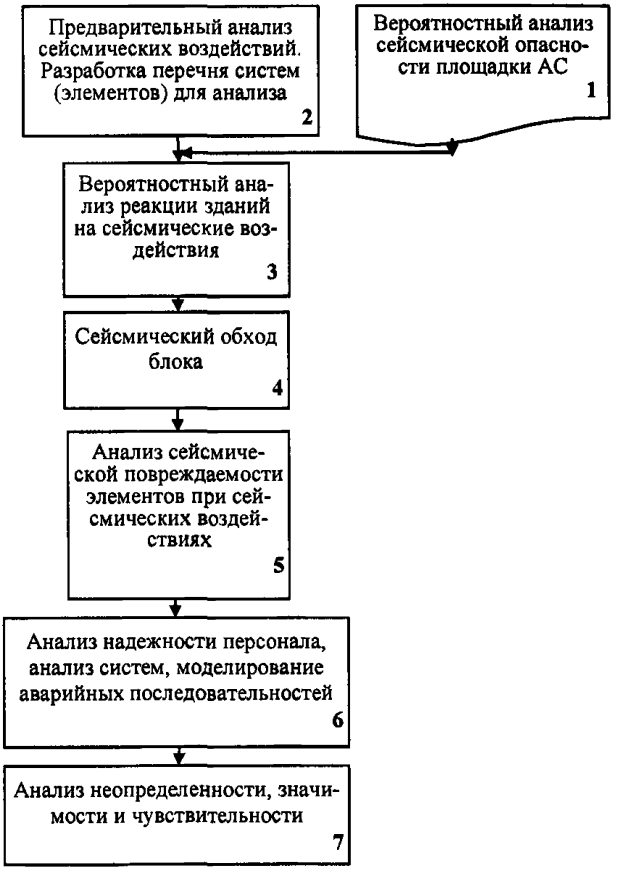
В отчетной документации по ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется приводить результаты анализа неопределенности, значимости, чувствительности.

XI. Анализ результатов ВАБ сейсмических воздействий и оценка уровня безопасности блока АС

В отчетной документации по ВАБ сейсмических воздействий рекомендуется приводить рекомендации по повышению уровня безопасности блока АС, разработанные по результатам ВАБ сейсмических воздействий, и вероятностные оценки их эффективности, включая технические и организационные меры.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 4
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Основные рекомендации к разработке
вероятностного анализа безопасности уровня 1
для блока атомной станции при исходных
событиях, обусловленных сейсмическими
воздействиями», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от 1 февраля 2017 г. № 33

Рекомендуемая последовательность и взаимосвязь задач ВАБ сейсмических воздействий



ПРИЛОЖЕНИЕ № 5
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Основные рекомендации к разработке
вероятностного анализа безопасности уровня 1
для блока атомной станции при исходных
событиях, обусловленных сейсмическими
воздействиями», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от 1 февраля 2017 г. № 33

Рекомендуемые подходы по вероятностному анализу сейсмической опасности

Основные этапы вероятностного анализа сейсмической опасности представлены на рис. 6.1. Указанные этапы дополняются анализом неопределенности, который выполняется методом логического дерева, изображенным на рис. 6.2.

При выполнении ВАБ сейсмических воздействий на этапе сооружения блока АС для оценки сейсмической опасности площадки строительства, допускается применять методику, основанную на использовании данных карт сейсмического районирования. Основные положения методики приведены в приложении № 5 РБ-006-98.

1. Схематизация источников

На данном этапе выполняется модельное упрощение очаговых зон до простых геометрических форм (точечные, линейные, двумерные и трехмерные фигуры) в зависимости от имеющейся информации. При определении возможных зон ВОЗ обычно предполагается, что землетрясения происходят внутри любого сегмента зоны равновероятно (равномерное распределение). Однако такое предположение необязательно и при наличии информации о неравномерном распределении активности внутри зоны может быть выбрано другое распределение.

Результатом данного этапа является плотность распределения $f_R(\mathrm{r})$, дающая функцию распределения расстояния до потенциального источника r, в виде

$$P(R < \mathrm{r}) = \int_{r_{\min}}^{r} f_R(\mathrm{r})\, dr \,. \qquad (6.1)$$

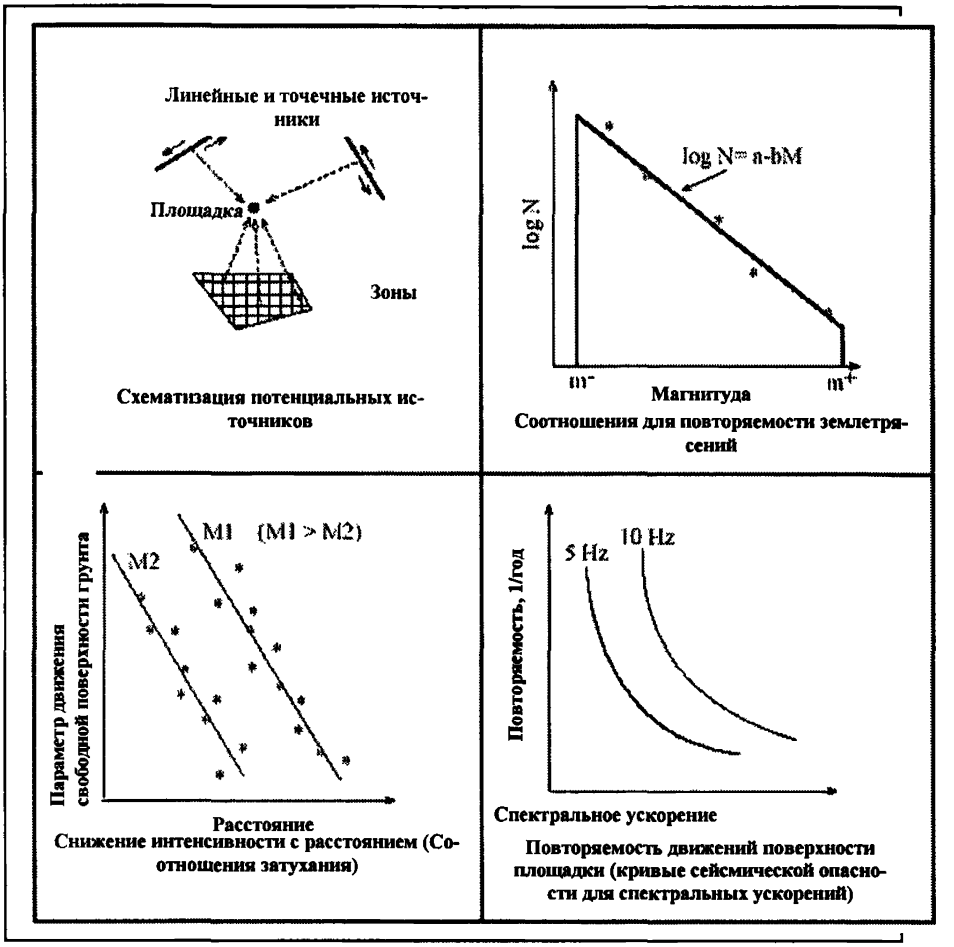


Рис. 6.1. Основные этапы вероятностного анализа сейсмической опасности площадки

2. Соотношения для повторяемости землетрясений

На втором этапе устанавливаются характеристики повторяемости землетрясений в источниках.

Общим подходом являются соотношения Гутенберга-Рихтера для повторяемости землетрясений:

$$\lg\lambda_m = a - b \cdot m, \qquad (6.2)$$

где: λ_m – средняя по году повторяемость превышения магнитуды m;

a и b – параметры, получаемые регрессией по данным сейсмичности источника.

Существуют различные способы определения магнитуды (локальная Рихтера M_L, объемных волн m_b, поверхностных волн (M_S, M_{LH}, M_{LV}), моментная M_W). При выполнении вероятностного анализа сейсмической опасности требуется обеспечить соответствие показателей магнитуда в соотношениях повторяемости и соотношениях затухания.

В соотношении (6.2) магнитуда не ограничена, что противоречит практике, поэтому соотношение (6.2) корректируется в форме:

$$\lambda_m = \nu_0 \cdot \frac{\left(\exp\left[-\beta\left(m - m_-\right)\right] - \exp\left[-\beta\left(m_+ - m_-\right)\right]\right)}{\left(1 - \exp\left[-\beta\left(m_+ - m_-\right)\right]\right)}, \qquad (6.3)$$

где: $\nu_0 = \exp(\alpha - \beta \cdot m_-)$;

ν_0 – повторяемость воздействий с нижней границей магнитуды m;

$\alpha = \ln(10) \cdot a$;

$\beta = \ln(10) \cdot b$;

m_+ – верхняя граница значений магнитуд;

m_- – нижняя граница значений магнитуд.

Определение нижней и верхней границ значений магнитуд представляет собой отдельное исследование, выполнение которого повышает достоверность вероятностного анализа сейсмической опасности и результаты которого позволяют достигнуть более реалистичных оценок. Отсутствие реалистичных значений указанных величин является причиной учета этой эпистемической неопределенности методом логического дерева.

Определяя функцию распределения магнитуды через плотность $f_M(\mathrm{m})$ как:

$$P\left(M < m \middle| m_- < m < m_+\right) = \int_{m_-}^{m} f_M(\mu)\, d\mu \qquad (6.4)$$

можно получить

$$\lambda_m = \nu_0 \cdot \left[1 - \int_{m_-}^{m} f_M(\mu)\, d\mu\right]. \qquad (6.5)$$

3. Соотношения затухания

Термин «затухание» здесь означает снижение сейсмического эффекта в зависимости от расстояния до очага. Сейсмический эффект в общем случае может определяться на свободной поверхности площадки или на свободной поверхности коренной породы. Законы затухания могут в общем виде учитывать различные параметры источника (виды подвижки в очаге, тип источника), параметры площадки (параметры характеризующие грунтовые условия площадки) и представляются обычно в виде среднего значения логарифма параметра движения (например в форме соотношения (6.6)) и стандартного отклонения:

$$\ln a = C_1 + C_2 \cdot m + C_3 \cdot m^{C_4} + C_5 \cdot \ln\left[r + C_6 \cdot \exp(C_7 \cdot m)\right] + C_8 \cdot r + \varphi(s_1, s_2 \ldots s_k) + \psi(p_1, p_2 \ldots p_k), \quad (6.6)$$

где: $C_1 \ldots C_8$ – константы регрессии (могут быть равными нулю);

m – магнитуда;

r – расстояние до источника (эпицентральное, гипоцентральное);

$s_1 \ldots s_k$ – параметры характеризующие источник;

$\varphi()$ – функция для учета параметров источника (может равняться нулю);

$p_1 \ldots p_k$ – параметры характеризующие грунтовые условия площадки;

$\psi()$ – функция для учета параметров характеризующих грунтовые условия площадки (может равняться нулю).

Окончательным результатом этого шага будет условная вероятность превышения некоторой величины параметра движения A для каждого рассматриваемого источника:

$$P(\mathrm{A} > a \,|\, m, r) = 1 - \Phi(\ln a, \sigma_{\ln a}). \quad (6.7)$$

4. Определение и представление результатов (кривых опасности)

Результаты предыдущих этапов по всем источникам объединяются соотношением, дающим годовую вероятность (частоту) превышения параметра движения:

$$\nu(a) = \sum_{n=1}^{N} \lambda_i(m_-) \int_{m_-}^{m_+} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) P(A > a | m, r) dm dr, \quad (6.8)$$

где индекс i относится к i-ому источнику.

Учет неопределенности, источники которой перечислены в пункте 20 настоящего Руководства по безопасности, выполняется путем построения логического дерева, фрагмент которого представлен на рис. 6.2 приложения № 5 к настоящему Руководству по безопасности.

Расчет кривых сейсмической опасности выполняется для каждого пути логического дерева и таким образом каждому конечному состоянию дерева соответствует своя кривая сейсмической опасности. Кроме этого для каждого пути логического дерева существует вес, вычисленный для этого пути, а сумма весов составляет единицу. Таким образом, для каждого значения параметра движения a получается n значений повторяемости, где n – число конечных состояний. Средневзвешенное (с учетом соответствующего веса) значение повторяемости, вычисленное для каждого фиксированного значения ускорения, в итоге формирует среднюю кривую сейсмической опасности. По аналогии с учетом весов определяются медианные значения и квантили кривых сейсмической опасности.

Для удобства выполнения отбора рекомендуется представлять кривую сейсмического риска $H(a)$ в виде:

$$H(a) = K_1 \times a^{-K_H}, \tag{6.9}$$

где K_1 и K_H – константы, определяемые, например, методом наименьших квадратов.

Если представить равенство для кривой сейсмического риска в виде линейной функции логарифма, получим:

$$\lg H(a) = \lg K_1 - K_H \cdot \lg a. \tag{6.10}$$

Примеры представления кривых сейсмической опасности для максимальных и спектральных ускорений представлены на рис. 6.3, 6.4, 6.5 и 6.6.

При большом количестве источников, участвующих в вероятностном анализе сейсмической опасности, может быть выполнен анализ их значимости в виде деагрегации.

Пример 1.

Точечный источник (Модель Корнуэлла)

Рассмотрим модель в виде точечного источника, показанную на рис. 6.7. Предполагается, что появление землетрясений от этого источника представляет собой Пуассоновский случайный процесс.

$P(N_t = n) = \dfrac{(\nu_0 \cdot t)^n}{n!} \exp(-\nu_0 \cdot t)$ – число событий в рассматриваемом интервале $(0, t)$.

Предположим для упрощения модели:

соотношения для повторяемости (6.3) ограничиваются только слева (только для малых магнитуд) таким образом $m_+ = \infty$;

константы в законе затухания (6.6) равны C_3, C_6, C_7, $C_8 = 0$; также не учитывается разброс закона затухания $C_9 = 0$. Функции $\varphi(\cdot)$ и $\psi(\cdot)$ отсутствуют, таким образом, закон затухания имеет вид:

$$Ln(a) = C_1 + C_2 \cdot m + C_5 \cdot \ln(r).$$

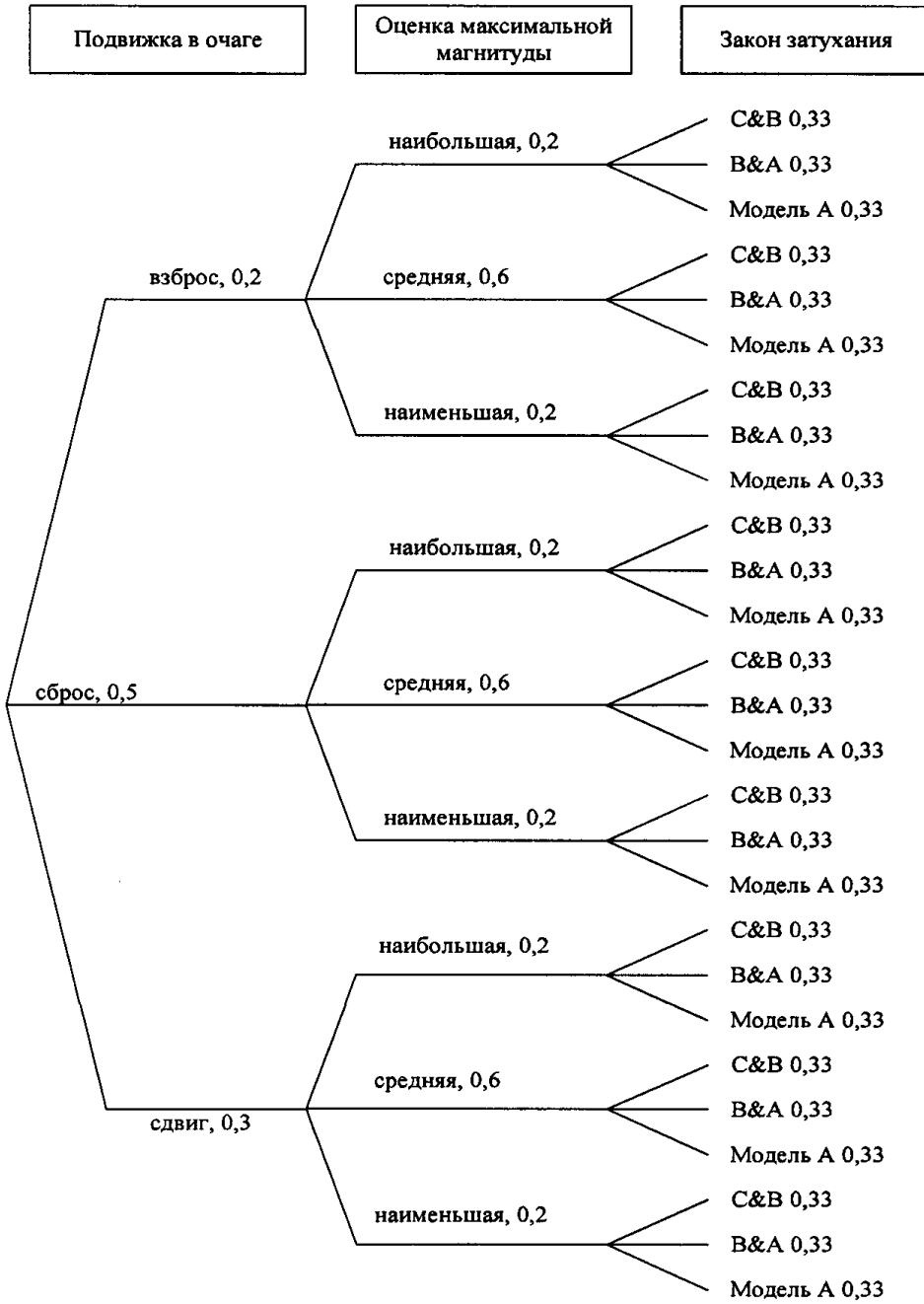


Рис. 6.2. Фрагмент логического дерева анализа неопределенности

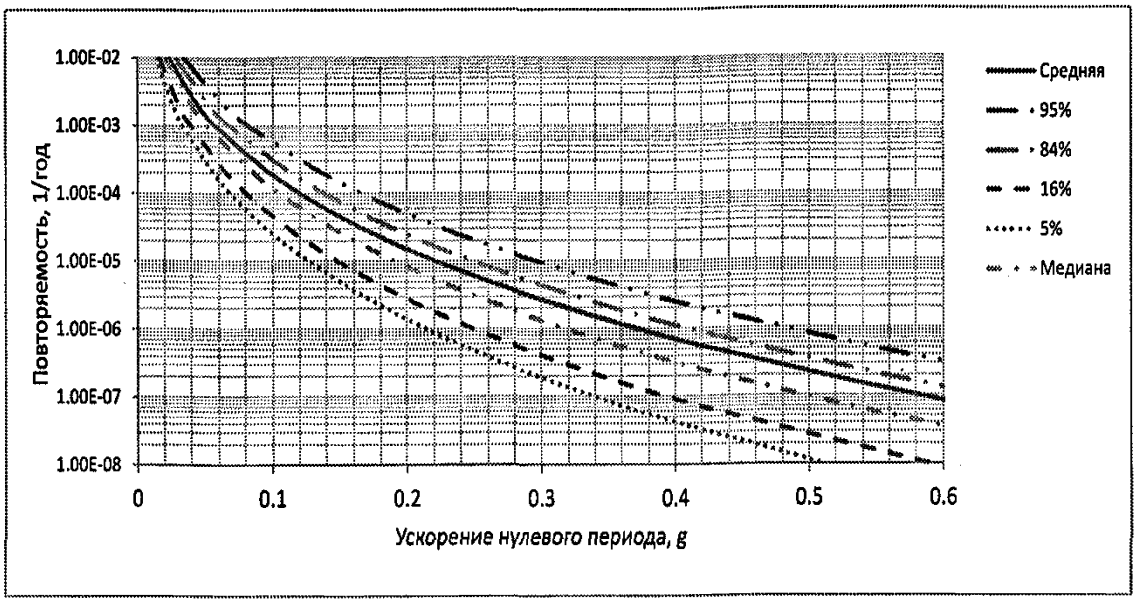


Рис. 6.3. Пример кривых сейсмической опасности для максимальных ускорений (или ускорений нулевого периода) и различных уровней доверительной вероятности

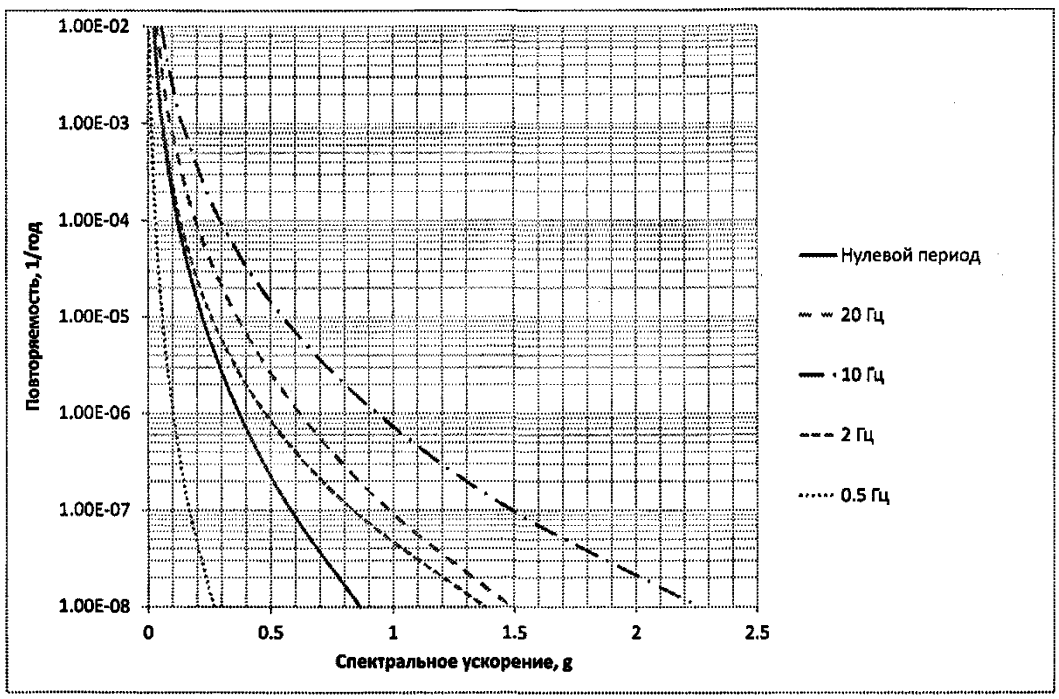


Рис. 6.4. Пример средних кривых сейсмической опасности для спектральных ускорений

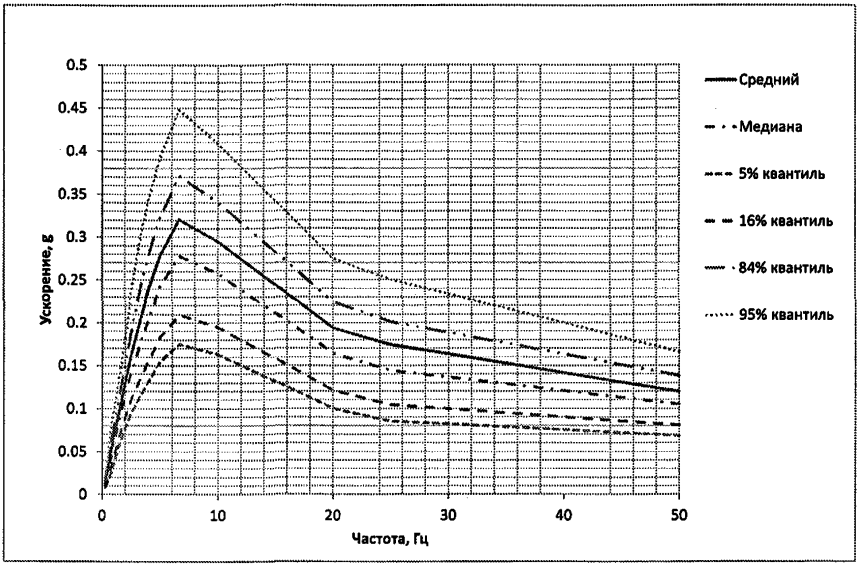


Рис. 6.5. Пример представления средних спектров ответа равных частот для частоты превышения 10^{-4} 1/год и различных квантилей (5 % от критического демпфирования)

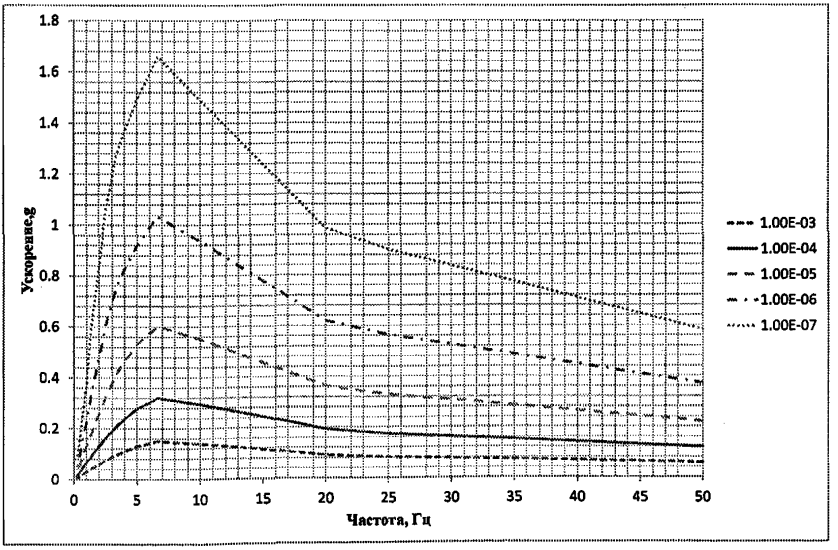


Рис. 6.6. Пример средних спектров ответа равных частот превышения для частот от 10^{-3} до 10^{-7} 1/год (5 % от критического демпфирования)

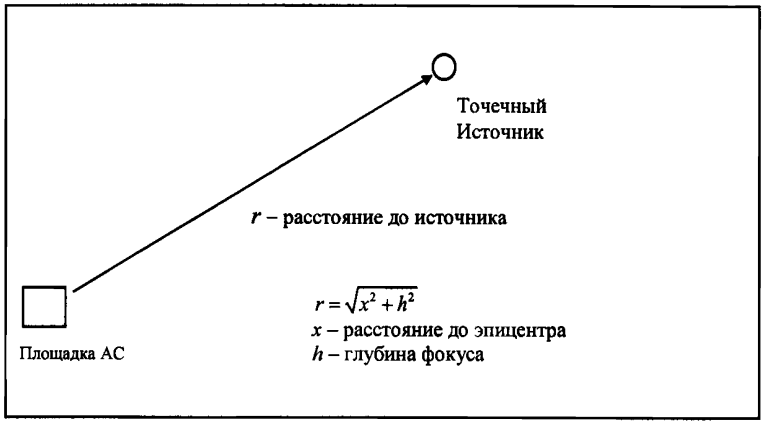


Рис. 6.7. Точечный источник

Соотношение (6.7) имеет детерминистическую форму:

$P(A>a|m,r)=1.$

Рассматриваемый пример относится к определению только одной кривой сейсмической опасности (логическое дерево для анализа неопределенности не разрабатывается). В этом случае:

$\lambda_m=\nu_0\cdot\exp\left[-\beta(m-m_)\right],$

а функция распределения для событий с магнитудой m:

$F_m(m)=1-\exp\left[-\beta(m-m_)\right];$

$f_M(m)=\beta\cdot\exp\left(-\beta(m-m_)\right);$

$f_R(r)=\delta(R-r),$

где $\delta(\cdot)$ – дельта (функция Дирака).

Вероятность, что магнитуда M_{max} самого интенсивного за год ($t=1$) землетрясения превысит m:

$$P(M_{\max}>m)=1-P(M_{\max}<m)=1-\sum_{n=0}^{\infty}\left[P(M<m)\right]^n\cdot P(N_t=n)=$$

$$=1-\exp\left[-\nu_0\cdot\exp\left(-\beta(m-m_)\right)\right].$$

Поскольку разброс закона затухания (C_9) не учитывается, то:

$$M_{\max}=\frac{1}{C_2}\cdot\ln\left(\frac{A_{\max}}{\exp(C_1)}\cdot r^{-C_3}\right),$$

где $A_{\max}$ – максимальное ускорение свободной поверхности при землетрясении в точечном источнике с магнитудой $M_{\max}$.

Тогда справедливо:

$$\nu(a) = P(M_{max} > m) = P(A_{max} > a) =$$

$$= 1 - \exp\left[-\nu_0 \cdot \exp\left[-\beta \left\{ \frac{1}{C_2} \cdot \ln\left(\frac{a}{\exp(C_1)} \cdot r^{-C_5} \right) - m_- \right\} \right] \right].$$

После математических преобразований можно получить:

$$\nu(a) = 1 - \exp\left(-\nu_0 \cdot d \cdot r^{-\gamma} \cdot a^{\frac{-\beta}{C_2}} \right) \approx \nu_0 \cdot d \cdot r^{-\gamma} \cdot a^{\frac{-\beta}{C_2}},$$

где:

$$\gamma = -\beta \frac{C_5}{C_2};$$

$$d = \exp\left(\beta \cdot \frac{C_1 + m_- \cdot C_2}{C_2} \right).$$

Ниже приведен численный пример.

Пусть площадка находится на расстоянии 30 км от гипоцентра точечного источника, расположенного на глубине 10 км. Из сейсмологической информации следует, что воздействия магнитудой более 4 происходят один раз в 50 лет, а величина β оценивается значением, равным 2.

Закон затухания для ускорений (в см/с^2) имеет следующие коэффициенты:

$C_1 = 7{,}6$ $C_2 = 0{,}8$ $C_5 = -2$,

тогда:

$d = 5.32\text{E}+11$;

$\gamma = 5$;

$r = \sqrt{30^2 + 10^2} = 31{,}62$ км;

$\nu_0 = 1/50 = 0{,}02$.

Тогда, например, для ускорения свободной поверхности 0,1g (98 см/с^2) получим частоту:

$$\nu(0{,}1g) = 0{,}02 \cdot \left(5.32 \cdot 10^{11}\right) \cdot \left(31{,}62\right)^{-5} \cdot \left(98\right)^{-2{,}5} = 0{,}0035 \text{ (1/год)}.$$

Для ряда значений ускорений получим кривую опасности (рис. 6.8) данной площадки с 1 точечным источником.

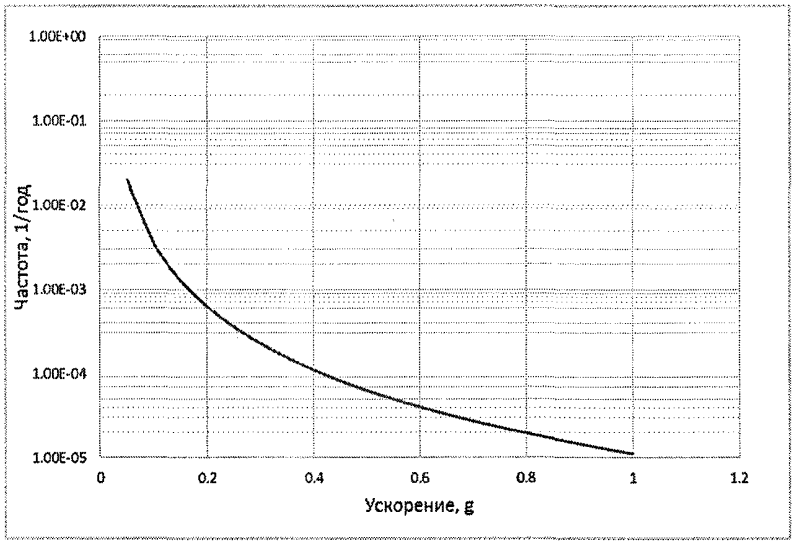


Рис. 6.8. Кривая опасности для примера с точечным источником

Модели, допускающие «ручные» расчеты, позволяют выполнить только приблизительные оценки. В них сложно учитывать ограничение магнитуд справа (максимальных m_+), разброс и современные сложные формы законов затухания, поэтому для вычисления кривых опасности используются численные методы.

Ниже на примере рассматриваются основные принципы их применения.

Пример 2.
Модель с линейным, прямоугольным и точечным источником

На рис. 6.9 приведена рассматриваемая модель.

Характеристики законов повторяемости (6.2) для источников приведены в таблице 6.1.

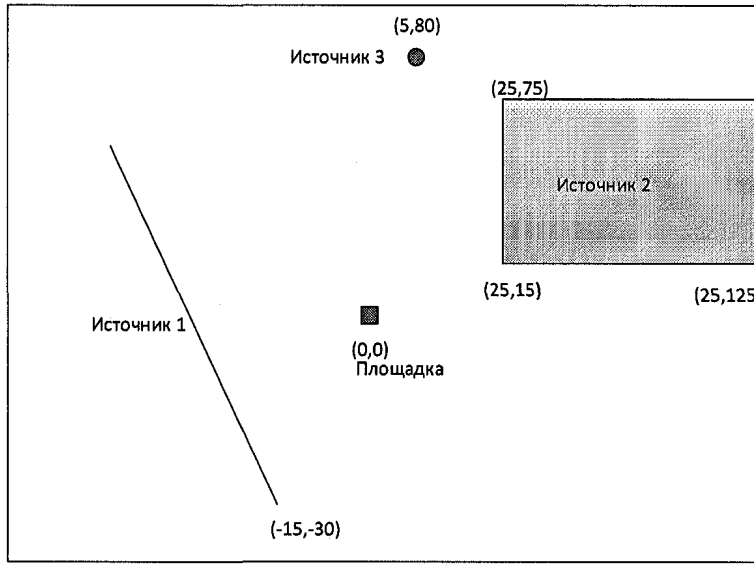


Рис. 6.9. Модель с тремя источниками

Таблица 6.1

Характеристики законов повторяемости

Источник	Закон повторяемости	m-	m+
Источник 1	$\lg\lambda(m) = 4 - m$	4	7,7
Источник 2	$\lg\lambda(m) = 4.5 - 1.2 \cdot m$	4	5
Источник 3	$\lg\lambda(m) = 3 - 0.8 \cdot m$	4	7,3

Закон затухания (6.6) задан в форме, предложенной Корнуэллом:

$$\ln(a) = 6{,}74 + 0{,}859 \cdot m - 1{,}80 \cdot \ln(r + 25),$$

где:

a – ускорение в см/с^2;

r – расстояние до эпицентра, км.

Стандартное отклонение:

$\sigma_{\ln a} = C_9 = 0{,}57$.

Покажем, каким образом могут быть получены функции $f_R(r)$ (6.1) и $f_M(m)$ (6.4) на примере получения одного слагаемого суммы выражения (6.8).

Получение всех слагаемых следует выполнять с использованием вычислительной техники.

Рассмотрим линейный источник № 1.

Максимальное расстояние от этого источника (точка с координатами (-50;75)) до площадки r_{max} = 90,14 км, минимальное расстояние – r_{min} = 23,72 км. Разделим линейный источник на 1000 равных отрезков точками. Кроме этого, разделим разницу $r_{max} - r_{min}$ на 100 равных отрезков, для каждой точки деления возьмем соответствующий радиус и вычислим количество точек источника, попадающих в кольцо между радиусами $(r_i, r_{i+1}), r_i \in [r_{min}, r_{max}]$.

Отношение числа точек, попадающих в отрезок к общему числу точек (1000), определяет частоту попадания радиуса для данного интервала.

Полученная таким образом для источника № 1 гистограмма приведена на рис. 6.9.

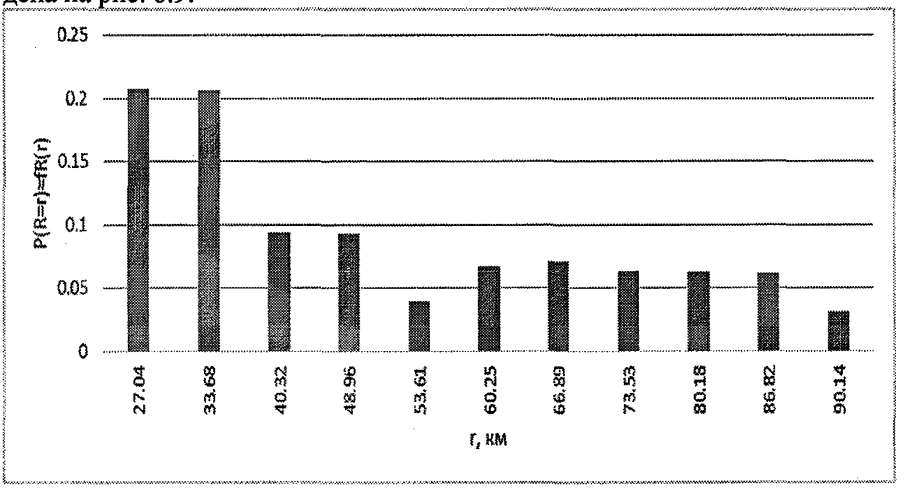


Рис. 6.9. Аппроксимация функции $f_R(r)$ для источника № 1

Для прямоугольного источника № 2 минимальное расстояние – r_{min} = 29,15 км, максимальное – r_{max} = 145,78 км.

Разницу расстояний $r_{max} - r_{min}$ разделим на 100 равных частей, для каждой точки деления возьмем соответствующий радиус. Разделим прямоугольный источник на 2500 одинаковых прямоугольников размером (2×1,2) км, возьмем точку на пересечении диагоналей каждого из прямоугольников, посчитаем количество точек, попадающих в каждый из отрезков.

Аналогично, как и для линейного источника, вычислим аппроксимацию функции $f_R(r)$ (рис. 6.10).

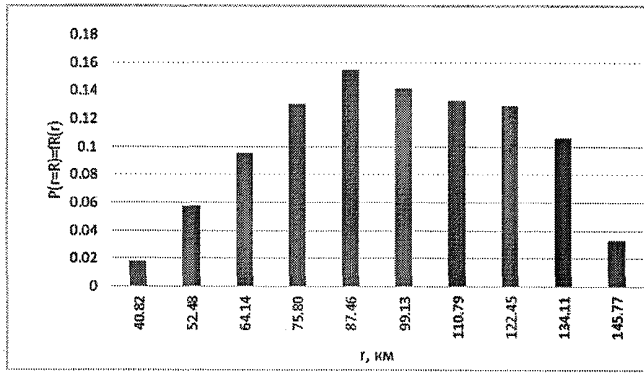


Рис. 6.10. Аппроксимация функции $f_R(r)$ для источника № 2

Для точечного источника аппроксимирующая функция очевидна (см. пример 1).

Из формул (6.3), (6.5):

$$f_M(m) = \frac{\beta \cdot \exp\left(-\beta\left(m - m_-\right)\right)}{1 - \exp\left(-\beta\left(m_+ - m_-\right)\right)}.$$

Для каждого источника в малом интервале магнитуд (m_1, m_2):

$$P\left(m_1 < m < m_2\right) = \int_{m_1}^{m_2} f_M(m)dm \approx f_M\left(\frac{m_1 + m_2}{2}\right)\left(m_2 - m_1\right).$$

Если для источника № 1 его возможный диапазон магнитуд от m_- = 4 до m_+ = 7,7 разделен на 10 отрезков, то для первого из них ($\beta = b \cdot \ln(10) = 1 \cdot \ln(10) \approx 2{,}303$):

$$P\left(4 < m < 4{,}37\right) \approx \frac{2{,}303 \cdot \exp\left(-2{,}303 \cdot \left(4{,}19 - 4\right)\right)}{1 - \exp\left(-2{,}303 \cdot \left(7{,}7 - 4\right)\right)}\left(4{,}37 - 4\right) = 0{,}556.$$

Построенная для 10 интервалов магнитуд гистограмма для P(m = M) приведена на рис. 6.11.

Таким образом, для источника № 1, если расстояние до площадки и диапазон магнитуды соответствует минимальному значению, то:

$$P\left(r = 27{,}04\right) = 0{,}208$$

$$P\left(m = 4{,}19\right) = 0{,}556\,.$$

Для этой комбинации m и r, согласно принятому закону затухания, логарифм максимального ускорения свободной поверхности $\ln(a) = 3{,}225$ (a = 0,025g).

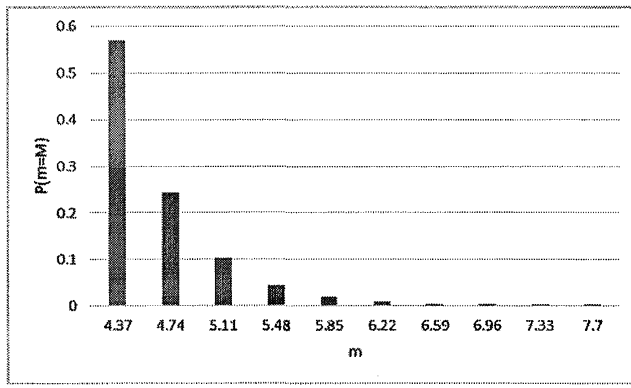


Рис. 6.11. Гистограмма P($m = M$) для 10 интервалов магнитуд

Предполагая, что неопределенность (C_9) в законе затухания (натуральный логарифм ускорения на свободной поверхности) имеет нормальное распределение со средним значением 3,225 (для данных значений m и r), определим частоту появления ускорения 0,05g на свободной поверхности:

$$P\left(A > a \middle| m, r\right) = P\left(A > 0{,}05g \middle| m = 4{,}19 r = 27{,}04\right) = 1 - \Phi(z),$$

где $\Phi(\cdot)$ – стандартная функция нормального распределения.

$$z = \frac{\ln(0{,}05 \cdot 981) - 3{,}225}{0{,}57} = 1.17$$

$1 - \Phi(1.17) = 0{,}121$

g = 981 см/с^2.

Определим первое слагаемого формулы (6.8):

$\lambda_1(m_.) = \lambda_1(4) = 1$ (второй столбец, первый ряд таблицы 6.1)

$$\nu_1^1(0{,}05g) = \lambda(m_.) \cdot P\left(A > 0{,}05g \middle| m = 4{,}19 r = 27{,}04\right) \cdot P\left(r = 27{,}04\right) \cdot P\left(m = 4{,}19\right) =$$

$$= 1 \cdot 0{,}121 \cdot 0{,}208 \cdot 0{,}556 = 0{,}014 \frac{1}{\text{год}}.$$

Для получения кривой опасности далее следует выполнить следующие действия: для уровня 0,05g просуммировать все значения частот для всех комбинаций значений m и r и для всех источников – таким образом будет получено значение частоты для превышения ускорения 0,05 g. Далее следует выполнить указанные действия для других значений ускорений и определить значения частот. Указанные действия рекомендуется выполнять с помощью вычислительной техники.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 6
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Основные рекомендации к разработке
вероятностного анализа безопасности уровня 1
для блока атомной станции при исходных
событиях, обусловленных сейсмическими
воздействиями», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от 1 февраля 2017 г. № 33

Рекомендуемые подходы для проведения вероятностного анализа сейсмической повреждаемости элементов

Основные характеристики логарифмически нормального распределения. Двойное логарифмически нормальное распределение

Логарифмически-нормальное распределение случайной величины определяется плотностью:

$$f(x)=\frac{1}{\beta\cdot x\cdot\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(\ln x-\mu)^2}{2\beta^2}},\ x>0,$$

зависящей от двух параметров μ и β,

где: μ – логарифм медианы (или медианного значения рассматриваемой случайной величины);

β – стандартное отклонение логарифма случайной величины.

Математическое ожидание m и стандартное отклонение σ_N для логарифмически нормального распределения могут быть определены как:

$$m=e^{\left(\mu+\frac{\beta^2}{2}\right)},$$

$$\sigma_N=\sqrt{e^{2\mu+\beta^2}\left(e^{\beta^2}-1\right)}.$$

Тогда для медианы $A_m=e^{\mu}$ справедливо:

$$m=A_m\cdot e^{\left(\frac{\beta^2}{2}\right)}.$$

При малых β (например <0,4):

$m \approx A_m$;

$$COV = \frac{\sigma_N}{m} = \sqrt{e^{\beta^2} - 1} \approx \beta,$$

где COV – коэффициент вариации.

Функция распределения логарифмически нормального распределения:

$$F(z) = P(X < z) = \frac{1}{\beta \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^z \frac{e^{\left(-(\ln s - \mu)^2 / 2\beta^2\right)}}{s} ds, 0 \le z \le +\infty.$$

Логарифмически нормальное распределение величины A может быть представлено в виде:

$A = A_m \cdot e^{\beta \cdot Z}$, где Z – случайная величина, имеющая стандартное нормальное распределение (среднее значение равно нулю, дисперсия равна единице).

Рассмотрим стандартную модель «нагрузка-прочность» (рис. 7.1).

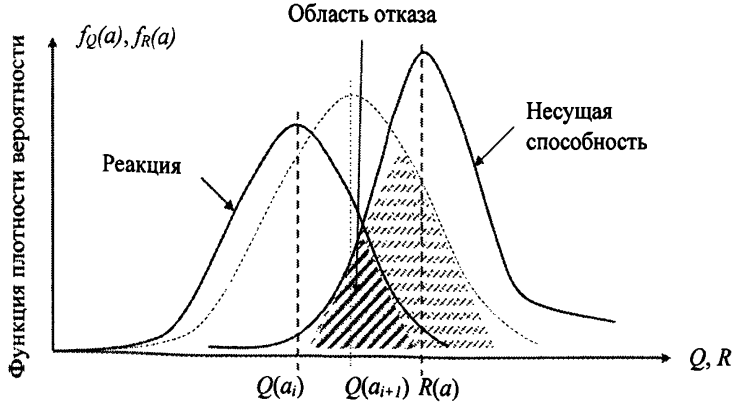


Рис. 7.1. Комбинация значений реакции и сейсмической повреждаемости, приводящая к отказу элемента

Для любого заданного уровня интенсивности сейсмического воздействия a_Q реакция в элементе будет представлять собой случайную величину, обусловленную рядом случайных факторов системы передачи воздействия от колебаний поверхности грунта к элементу (например, разбросом свойств грунтового основания, жесткостных и массовых характеристик элементов строительных конструкций, демпфирования). При этом несущая способность элемента, т.е. способность воспринимать усилия реакции, также является случайной величиной, обусловленной разбросом прочности материалов и другими случайными параметрами, относящимися к свойствам конструкции элемента. Предположим, что нагрузка и несущая способность являются независимыми случайными величинами, распределенными по нормальному закону. В общем случае процедура определения кривой сейсмической повреждаемости элемента сводится к определению совместной плотности вероятности реакции, действующей на элемент, и его несущей способности. На рис. 7.1 показан график плотности распределения случайной величины, которая условно называется «Реакция» и график плотности распределения другой случайной величины – «Несущая способность». Область, образованная пересечением площадей под этими кривыми, представляет собой область отказов. В частном случае, когда расчетные величины можно разделить на две группы, где первая включает характеристики, относящиеся к свойствам самой конструкции, а вторая характеризует внешние воздействия, в приложении к задачам расчета на прочность условие отказа математически будет выражаться неравенством:

$g = R - Q < 0$,

где Q – реакция или нагрузочный эффект;

R – несущая способность, выраженная в тех же единицах, что и нагрузочный эффект Q;

g – функция работоспособности или резерв прочности.

Если случайные величины R и Q независимы, математическое ожидание и стандартное отклонение резерва прочности соответственно равны:

$$m_g = m_R - m_Q, \quad \sigma_g = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2},$$

где:

m_R и σ_R – математическое ожидание и стандартное отклонение распределения несущей способности;

m_Q и σ_Q – математическое ожидание и стандартное отклонение распределения нагрузочного эффекта.

Для нормального распределения случайных величин вероятность отказа определяется по формуле:

$$P_f = 1 - \Phi\left(\frac{m_R - m_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}\right) = \Phi\left(\frac{m_Q - m_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}\right),$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция стандартного нормального распределения.

Если функции R и Q распределены логарифмически нормально и независимы, приведенное выше соотношение можно представить в виде:

$$P_f = P\left(\frac{Q}{R} < 1\right) = P\left(\ln(Q) - \ln(R) < 0\right) = \Phi\left(\frac{m_{\ln(Q)} - m_{\ln(R)}}{\sqrt{\sigma_{\ln(R)}^2 + \sigma_{\ln(Q)}^2}}\right),$$

где: $\frac{Q}{R}$ – запас по несущей способности (случайная величина);

$m_{\ln(R)}, \sigma_{\ln(R)}$ – математическое ожидание и стандартное отклонение натурального логарифма реакции;

$m_{\ln(Q)}, \sigma_{\ln(Q)}$ – математическое ожидание и стандартное отклонение натурального логарифма характеристики несущей способности.

Если S_m и R_m – медианные значения «нагрузки» Q и «прочности» R, справедливо:

$m_{\ln(R)} = \ln(R_m)$;

$m_{\ln(Q)} = \ln(Q_m)$;

$\sigma_{\ln(Q)} = \beta_Q$;

$\sigma_{\ln(R)} = \beta_R$;

$\beta_C = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_Q^2}$, тогда при землетрясении с ускорением на свободной поверхности a случайной величиной будет нагрузка на рассматриваемый элемент $Q(a)$, а ее медиана – $Q_m(a)$.

Тогда для рассматриваемого элемента справедливо:

$$f(a) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{Q_m(a)}{R_m}\right)}{\beta_C}\right).$$

Указанное соотношение в общем виде определяет кривую повреждаемости элемента с параметрами R_m и β_C.

Переходя от нагрузок и несущей способности на элемент (на отметке) к нагрузкам и несущей способности на свободной поверхности, выраженным в ускорениях, получим традиционный вид средней кривой сейсмической повреждаемости:

$$f(a)=\Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{a}{A_m}\right)}{\beta_C}\right),$$

где A_m – медианное значение несущей способности элемента, выраженное в форме величины ускорения свободной поверхности при землетрясении, при котором наступает отказ элемента.

В анализе повреждаемости используется двойное логарифмически нормальное распределение:

$$A = A_m \cdot e^{\beta_U \cdot X} \cdot e^{\beta_R \cdot Y} = A_m \cdot \tilde{\varepsilon}_U \cdot \tilde{\varepsilon}_R,$$

где: β_U, β_R – характеристики алеаторной и эпистемической неопределенности;

$$\tilde{\varepsilon}_U = e^{\beta_U \cdot X}, \tilde{\varepsilon}_R = e^{\beta_R \cdot Y};$$

X, Y – случайные величины, имеющие стандартное нормальное распределение.

Такая форма представления предполагает, что изменение предельного ускорения вследствие эпистемической неопределенности может упрощенно быть представлено в виде случайного сдвига медианного значения этого ускорения в зону меньших и больших значений, а алеаторная неопределенность определяет форму «сдвинутой» кривой повреждаемости (рис. 7.2).

Метод повреждаемости (масштабирования)

Сейсмическая повреждаемость элемента, выраженная через максимальное ускорение на свободной поверхности грунта, при котором имеет место отказ элемента, представляется в виде двойной логарифмически нормально-распределенной случайной величины $\tilde{A}$:

$$\tilde{A} = A_m \cdot \tilde{\varepsilon}_R \cdot \tilde{\varepsilon}_U, \qquad (7.1)$$

где: A_m – медианное значение случайной величины $\tilde{A}$;

$\tilde{\varepsilon}_U, \tilde{\varepsilon}_R$ – логарифмически нормально-распределенные случайные величины с единичной медианой и логарифмическими стандартными отклонениями β_U, β_R. Эти случайные величины определяют разброс случайной величины $\tilde{A}$ вследствие влияния различных факторов:

$\tilde{\varepsilon}_R$ – определяет алеаторный разброс;

$\tilde{\varepsilon}_U$ – определяет эпистемический разброс.

Кривая сейсмической повреждаемости для доверительной вероятности Q определяется выражением: $f(a) = \Phi\left[\dfrac{\ln\left(\dfrac{a}{A_m}\right) + \beta_U \Phi^{-1}(Q)}{\beta_R}\right]$, (7.2)

где $\Phi(\cdot)$ и $\Phi^{-1}(\cdot)$ – прямая и обратная стандартные функции нормального распределения;

Q – уровень доверительной вероятности.

Медианная кривая получается из выражения (7.2) подстановкой в (7.2) Q=0,5, принимая в учет, что $\Phi^{-1}(0,5)$=0 (или принять β_u=0, т.е без учета параметра эпистемической неопределенности β_u).

Кривая для 95 % доверительной вероятности получается подстановкой в (7.2) Q=0,95.

Кроме этого можно рассматривать повреждаемость в виде средней кривой:

$$\tilde{A} = A_m \cdot \tilde{\varepsilon}_C, \tag{7.3}$$

где $\tilde{\varepsilon}_C$ определяет суммарный разброс.

Средняя (композитная) кривая определяется соотношением:

$$f(a) = \Phi\left[\frac{\ln\left(\dfrac{a}{A_m}\right)}{\beta_C}\right], \tag{7.4}$$

где $\beta_C = \sqrt{\beta_U^2 + \beta_R^2}$ – комбинированная неопределенность.

На рис. 7.2 в качестве примера приведены кривые сейсмической повреждаемости для различных квантилей. Характерными точками кривых являются: медиана A_m, соответствующая условной вероятности 0,5 на медианной и средней кривых, и точка, соответствующая на горизонтальной оси граничной сейсмостойкости элемента (HCLPF).

Ускорению HCLPF соответствует значение вероятности 0,05 на кривой 95 % доверительной вероятности или 0,01 на средней (композитной) кривой.

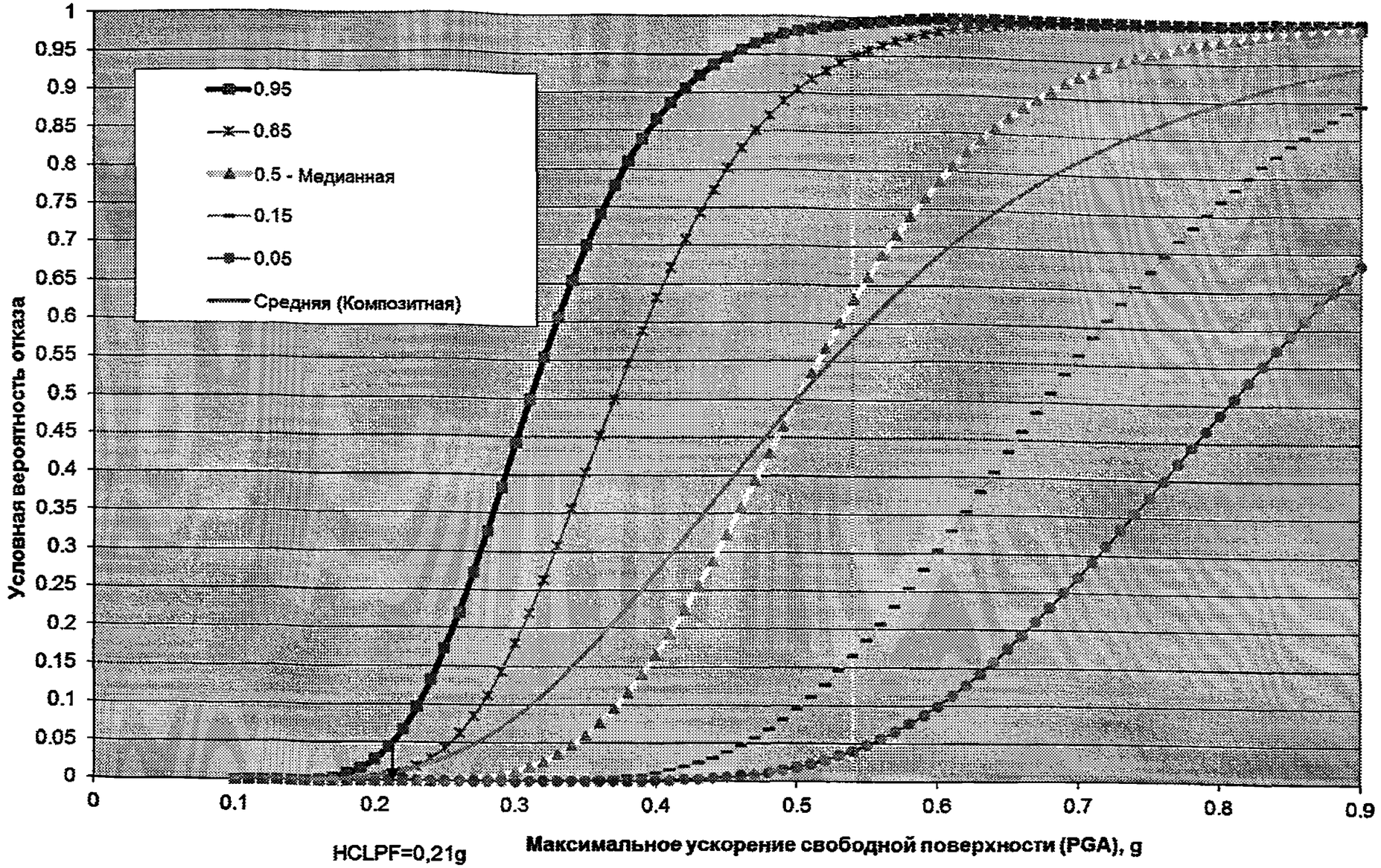


Рис. 7.2. Пример кривых сейсмической повреждаемости

Здесь, по отношению к кривым повреждаемости, устойчивый термин «средняя» относится не к характеристике распределения, а к способу обобщения кривых сейсмической повреждаемости, имеющих различный уровень доверительной вероятности. Среднюю кривую правильнее называть средневзвешенной.

Для определения характеристик сейсмической повреждаемости A_m, β_U, β_R величина $\tilde{A}$ записывается в виде произведения:

$$\tilde{A} = \tilde{F} \cdot A_p, \tag{7.5}$$

где A_p – максимальное ускорение (нулевого периода) на свободной поверхности грунта землетрясения повторяемостью 10^{-4} 1/год по средней кривой сейсмической опасности (для среднего спектра ответа равной частоты превышения 10^{-4} 1/год);

допускается, что полученное в вероятностном анализе сейсмической опасности значение A_p может отличаться от ускорения МРЗ, принятого в проекте;

$\tilde{F}$ – статистический коэффициент запаса (случайная величина, характеризующая коэффициент запаса по несущей способности элемента при землетрясении, соответствующем повторяемости 10^{-4} по средней кривой сейсмической опасности);

$\tilde{F}$ – отношение предельной нагрузки в элементе (т.е. нагрузки от предельного для элемента землетрясения) к нагрузке (реакции) в элементе от воздействия A_p; масштабирующий коэффициент (случайная величина), на которую нужно умножить расчетное ускорение для того, чтобы получить ускорение (случайную величину) на свободной поверхности, при котором имеет место отказ.

Принято использовать метод разделения переменных для отдельного учета факторов, влияющих на статистический коэффициент запаса. Предполагается, что ранее для элемента было выполнено проектное обоснование сейсмостойкости и таким образом выполнен следующий объем обоснований:

установлен уровень расчетного землетрясения, например МРЗ;

если рассматриваемый элемент – строительная конструкция – выполнен расчет нагрузок в строительных конструкциях (реакции в строительных конструкциях) и расчет прочности элемента;

если рассматриваемый элемент – оборудование – определено воздействие на элемент от строительной конструкции, на которой он закреплен (спектры ответа), выполнен расчет нагрузок в элементе от расчетного воздействия и расчет прочности элемента.

Методом предполагается, что на каждом из этих этапов для определений нагрузок, реакции и прочности есть отличие реалистического подхода от консервативного, необходимого при проектном обосновании.

Коэффициент $\tilde{F}$ можно представить в следующем виде:

$$\tilde{F} = \tilde{F}_1 \cdot \tilde{F}_2 \cdot \tilde{F}_3, \tag{7.6}$$

где:

$\tilde{F}_1$ – отношение разрушающей нагрузки, определенной с применением реалистичных подходов к допускаемой нагрузке, регламентированной нормативным подходом;

$\tilde{F}_2$ – отношение допускаемой нагрузки к нагрузке расчетного землетрясения (МРЗ, ПЗ), регламентированной нормативным подходом;

$\tilde{F}_3$ – отношение нагрузки расчетного землетрясения (МРЗ, ПЗ), определенной нормативным подходом к нагрузке землетрясения повторяемостью
10^{-4} 1/год по средней кривой сейсмической опасности A_p, определенной реалистичным подходом.

Эквивалентное представление $\tilde{F}$:

для зданий и сооружений: $\tilde{F} = \tilde{F}_C \cdot \tilde{F}_{RS}$, (7.7)

для оборудования: $\tilde{F} = \tilde{F}_C \cdot \tilde{F}_{RE} \cdot \tilde{F}_{RS}$, (7.8)

где: $\tilde{F}_C = \tilde{F}_1 \cdot \tilde{F}_2$ – коэффициент запаса по несущей способности (случайная величина);

$\tilde{F}_{RS}$ – коэффициент реакции сооружения (случайная величина);

$\tilde{F}_{RE}$ – коэффициент реакции оборудования относительно сооружения, в котором оно установлено (случайная величина) – отношение реакции оборудования при расчетном землетрясении, определенной нормативным подходом к нагрузке от A_P, определенной реалистичным подходом.

Соответственно:

для сооружений $\tilde{F}_{RS} = \tilde{F}_3$, (7.9)

для оборудования $\tilde{F}_{RE} \cdot \tilde{F}_{RS} = \tilde{F}_3$. (7.10)

Коэффициент запаса $\tilde{F}_C$ представляется как произведение двух случайных величин $\tilde{F}_S$ и $\tilde{F}_\mu$, которые позволяют раздельно учесть запас по

отношению к усилиям, определенный линейным расчетом, и запас, связанный с работой конструкции элемента за пределами упругости:

$$\tilde{F}_c = \tilde{F}_S \cdot \tilde{F}_\mu . \qquad (7.11)$$

Коэффициент запаса $\tilde{F}_S$ представляет собой отношение предельного усилия (или перемещения), при достижении которого элемент теряет возможность выполнять свои функции, к соответствующему усилию, возникающему при расчетном землетрясении:

$$\tilde{F}_S = \frac{S - P_N}{P_T - P_N}, \qquad (7.12)$$

где: S – предельная нагрузка, которую может воспринять рассматриваемый элемент в отношении рассматриваемого вида отказа;

P_N – усилие от эксплуатационной нагрузки (НЭ);

P_T – суммарное усилие (сейсмическое воздействие + НЭ).

В общем случае эти нагрузки – случайные величины, имеющие свои статистические характеристики. Тогда среднее значение и отклонение коэффициента $\tilde{F}_S$ могут быть определены методом «Монте-Карло» или другим методом (например, первого момента).

Коэффициент $\tilde{F}_\mu$ учитывает рассеяние энергии за пределами упругости. Методы определения этого коэффициента приведены в документе EPRI TR103959.

Коэффициент реакции конструкции $\tilde{F}_{RS}$ – случайная величина, которая учитывает, что расчеты, выполненные в рамках проекта, основаны на определенных (часто консервативных) детерминистических параметрах конструкции и реакции в ней. В зависимости от необходимости учета факторов, влияющих на реакцию конструкции, он может быть определен в виде произведения, например, соответствующих коэффициентов случайных величин (IAEA-TECDOC-1487 Annex 1):

$$\tilde{F}_{RS} = \prod \tilde{F}_{RS_i}, \qquad (7.13)$$

где в виде коэффициентов могут быть учтены различные факторы, например:

отличие и разброс в реакции вследствие отличия проектного спектра (например, МРЗ) и спектра, полученного в результате анализа сейсмической опасности площадки (в случае масштабирования расчетов сейсмостойкости, выполненных в проектном обосновании в соответствии с абзацем 3 пункта 36 настоящего Руководства по безопасности);

некогерентность сейсмических волн;

отличие реалистичного демпфирования от демпфирования согласно нормативным документам;

неопределенность моделей;

методы сложения собственных форм;

метод учета совместного воздействия пространственных компонент воздействия;

эффекты взаимодействия «грунт-сооружение», включая изменение интенсивности воздействия с глубиной относительно земной поверхности для заглубленных сооружений.

Каждый из коэффициентов, как случайная величина, имеющая двойное логарифмически нормальное распределение, может иметь медиану и свой эпистемический и алеаторный разброс β_u и β_R соответственно. Определить их в общем случае можно либо проводя варьирование параметров, влияющих на каждый из факторов отдельно с целью выяснения его медианы и разбросов (метод разделения переменных), либо используя опыт уже выполненных исследований.

Используя свойства логарифмически-нормального распределения, медианное значение коэффициента $\tilde{F}_{RS}$ определяется как:

$$\tilde{F}_{RS} = \prod \tilde{F}_{RS_{m_i}}, \qquad (7.14)$$

где m – индекс, означает медианные значения соответствующих коэффициентов.

Коэффициент $\tilde{F}_{RE}$ для оборудования может по-разному представляться, в зависимости от того, какой метод использовался для обоснования сейсмостойкости элемента.

Для жесткого оборудования (имеющего высокие собственные частоты) достаточно учета неопределенности моделирования и учета совместного воздействия пространственных компонент воздействия.

Для оборудования, имеющего собственные частоты в диапазоне спектров рассматриваемых воздействий, могут также быть учтены различия в расчетном и реалистичном спектральных ускорениях, отличия в демпфировании, погрешности метода аттестации (при экспериментальном обосновании) и т.п.

Характеристики сейсмической повреждаемости A_m, β_U и β_R определяются из соотношений:

$$A_m = F_m \cdot A_p, \qquad (7.15)$$

$$\beta_U = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \beta_{U_i}^2}\,, \tag{7.16}$$

$$\beta_R = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \beta_{R_i}^2}\,, \tag{7.17}$$

$$F_m = F_{Cm} \cdot F_{RSm} \cdot F_{RE_m}\,, \tag{7.18}$$

$$HCLPF = A_m \cdot e^{-1{,}65(\beta_U + \beta_R)}\,, \tag{7.19}$$

где $\tilde{F}_{Cm}$, $\tilde{F}_{RSm}$, $\tilde{F}_{REm}$ – медианные значения коэффициентов запаса по несущей способности, реакции сооружений и оборудования соответственно.

Упрощенный метод расчета сейсмической повреждаемости (гибридный метод)

Метод основан на обобщении результатов ранее выполненных ВАБ для сейсмических воздействий и позволяет упростить процедуру оценки сейсмической повреждаемости элементов путем использования характеристик HCLPF, которые оцениваются детерминистическими методами или непрямыми методами (IAEA-TECDOC-1333, EPRI NP-6041-SL) после выполнения сейсмических обходов блока.

Описание метода приведено в техническом документе МАГАТЭ IAEA-TECDOC-1487.

Гибридный метод предполагает следующий порядок действий:

оценить HCLPF для рассматриваемого элемента или оценить значение максимального параметра интенсивности на свободной поверхности грунта, при котором его условная вероятность равна 0,01 (или 1%);

назначить логарифмически-нормальное отклонение β_C , используя следующие рекомендации:

для строительных конструкций и основного пассивного механического оборудования на низких отметках или на уровне свободной поверхности β_C – в интервале 0,3 … 0,5;

для активных элементов расположенных на высоких отметках в зданиях β_C – в интервале 0,4 … 0,6; в качестве консервативной оценки используется $\beta_C = 0{,}4$;

рассчитать медианное значение несущей способности из следующего соотношения:

$$A_m = HCLPF \cdot e^{2.33\beta_C}\,; \tag{7.20}$$

получить оценку кривой повреждаемости согласно формуле (7.20).

Для оценки HCLPF элементов предлагается использовать детерминистический метод (CDFM) [EPRI NP-6041-SL, EPRI 1019200, IAEA Safety Report 28] или воспользоваться непрямыми методами обоснования сейсмостойкости по результатам сейсмического обхода блока АС (IAEA-TECDOC-1333, EPRI NP-6041-SL).

Пример

Рассматривается вертикальный насос, подающий воду для охлаждения. Анализ потенциальных отказов включает в себя различные виды отказов, в том числе отказы анкерной конструкции. Одним из потенциальных видов отказа является отказ опорной конструкции электродвигателя, передающего крутящий момент на вал насоса, последствием которого может являться функциональный отказ насосного агрегата. В данном примере рассматривается получение кривой сейсмической повреждаемости для данного вида отказа. Электродвигатель (рис. 7.3) закреплен на опорной конструкции, представляющей собой цилиндр с двумя вырезанными окнами, в результате образующими две арки с углами 120°, которые работают как консольные балки при приложении поперечной нагрузки.

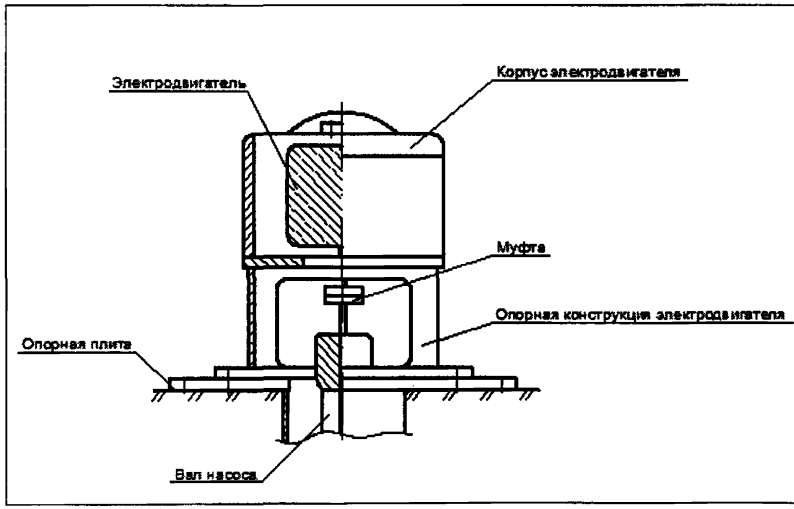


Рис. 7.3. Схема закрепления электродвигателя насоса

Расчетная схема приведена на рис. 7.4.

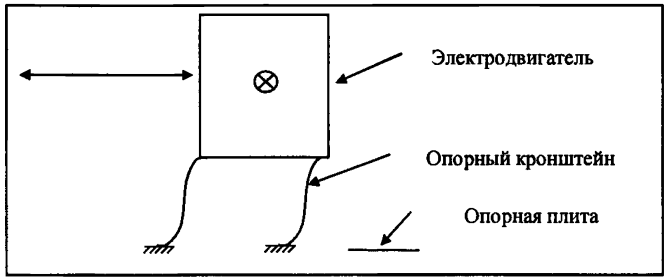


Рис. 7.4. Расчетная схема

Коэффициенты в данном примере зависят от специфики выполненных расчетов и для других случаев могут быть другими (иметь другое наполнение).

Коэффициент запаса по несущей способности *Fc*

Опорная конструкция выполнена из стали, имеющей при расчетной температуре минимальный предел текучести $\sigma_{0,2}^{T} = 250 МПа$. Будем предполагать, что это значение гарантировано с 95 % уровнем превышения. Значения коэффициента вариации для нормального распределения предела текучести углеродистой стали ориентировочно находятся вблизи значения 0,1.

Используя свойства логарифмически нормального распределения, получим, что эпистемическая неопределенность, связанная с незнанием фактических свойств материала, – $\beta_{u1} \approx 0,1$, а медианное значение свойств материала ≈ 300 МПа. Здесь мы принимаем допущение, что отличие нормального закона от логнормального в данном конкретном случае и в зоне практического применения в данной задаче не существенно.

В расчете суммарные напряжения от изгиба и растяжения (сжатия) от горизонтальных и вертикальной компоненты сейсмического воздействия составили 50 МПа. Расчет был выполнен специально для определения сейсмической повреждаемости, поэтому его результаты можно считать имеющими медианную оценку нагрузки.

Медианное значение коэффициента F_S можно получить, используя формулу (7.12) и пренебрегая эксплуатационной нагрузкой (собственный вес):

$$F_S = \frac{300}{50} = 6.$$

Из расчетного статического анализа следует, что пластическое течение в сечении опорной конструкции (пластический шарнир) формируется при возрастании нагрузки в 1,5 раза выше, чем нагрузка начала образования пластических деформаций. Из анализа эксплуатационной документа-

ции следует, что такое увеличение может привести к перекосу и повреждению муфты между валом электродвигателя и валом насосного механизма, поэтому коэффициент F_μ был принят равным 1,5, а коэффициент запаса по несущей способности F_c:

$$F_c = F_\mu \cdot F_S = 1{,}5 \cdot 6 = 9 .$$

Считая значение F_μ = 1,5 медианным, а значение равное единице, имеющим 95 % уровень превышения получим:

$$\beta_{u_2} = (1/1{,}65) \cdot \ln(1{,}5) = 0{,}245 ,$$

где значение 1,65 соответствует величине обратной функции для стандартного нормального распределения при значении 0,95.

Итоговое значение эпистемического разброса для коэффициента запаса по несущей способности F_c согласно (7.16):

$$\beta_U = \sqrt{\beta_{U_1}^2 + \beta_{U_2}^2} = \sqrt{0{,}1^2 + 0{,}245^2} = 0{,}26 .$$

Коэффициент реакции оборудования F_{RE}

Параметры коэффициента реакции: метод расчета, демпфирование, моделирование, суммирование собственных форм и комбинация компонент землетрясения.

Метод расчета

Измеренное во время процедуры обследования значение собственной частоты (6,81 Гц) рассматриваемой формы колебаний несколько отличается от принятого ранее в расчете (4,23 Гц).

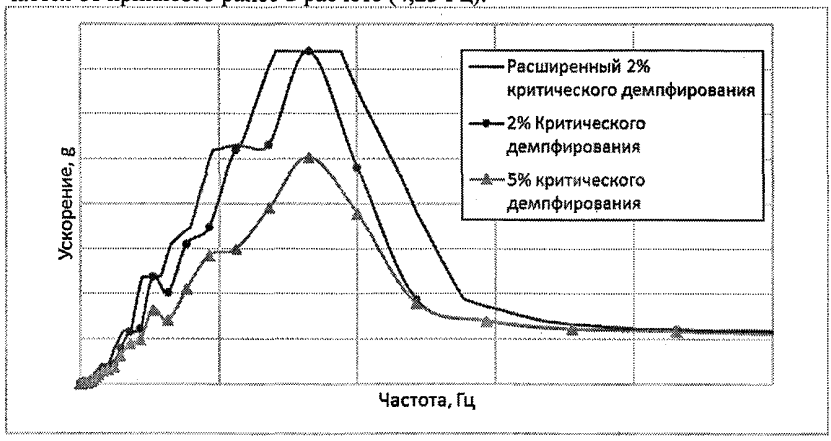


Рис. 7.5. Спектры ответа на отметке установки элемента

Демпфирование в расчете было принято согласно НП-031-01 равным 2 % от критического. Медианным значением демпфирования считается значение при состоянии, близком к отказу, которое оценивается как 5 % от критического.

В ранее выполненном расчете использовался расширенный 2 % спектр. Отличие спектрального ускорения (на частоте 4,23 Гц) расчетного расширенного 2 % спектра от спектрального ускорения на частоте 6,81 Гц для 5 % спектра (рис. 7.5) оценивается как:

$$F_{QM} = \frac{0,81g}{0,78g} = 1,03.$$

Неопределенность в обработке спектра оценивается как отличие 2 % расширенного спектра от 2 % на частоте 6,81 Гц. Считая, что расширение обеспечивает 99 % вероятность непревышения (+2,33β), получим (на частоте 6,81 Гц) по формулам свойств логнормального распределения:

$$\beta_{U_1} = \frac{1}{2.33}\ln\left(\frac{1,41g}{1,06g}\right) = 0,12.$$

Демпфирование

Расчетная частота электродвигателя была равна 4,23 Гц, соответствующее ускорение – 0,81g. Считается, что 5 % демпфирование является медианным. Однако при расчете коэффициента учета демпфирования и его неопределенности (β_U) следует сначала откорректировать частоту, которая изменилась в связи с обновлением расчета. Демпфирование было учтено при расчете предыдущего коэффициента, поэтому $F_D = 1$. Частота 6,81 Гц находится в зоне усиления спектров ответа. В этой зоне отношение спектров (ускорений) с различными коэффициентами затуханиями (в долях от критического) на выбранной частоте примерно обратно пропорциональны квадратному корню отношения этих коэффициентов затухания.

Предполагается, что 2 % спектр образовывает границу, соответствующую значению стандартного отклонения – $2\beta_U$, в то время как 5 % спектр является медианным ($\beta_U = 0$) (такое предположение предлагается в виде экспертной оценки). В этом случае:

$$\beta_{U_2} = \frac{1}{2}\ln\sqrt{\left(\frac{5\%}{2\%}\right)} = 0,23.$$

Моделирование

Рассматривается возможное снижение собственной частоты вследствие изменения демпфирования и развития нелинейных деформаций. Существуют различные методы, позволяющие выполнить учет изменения нагрузки на элемент вследствие указанных эффектов. Здесь такой учет выполнен на основании экспертного подхода.

Как отмечалось выше, собственная частота 6,81 Гц находится в зоне роста спектра. При снижении собственной частоты нагрузка на опорную конструкцию также будет снижаться в соответствии со спектром ответа. Рационально предположить снижение собственной частоты примерно на 10 % (медианное значение) вследствие развития нелинейных деформаций в предотказном состоянии. При этом (см. рис. 7.5, график с 5 % уровнем от критического) возможный разброс ограничен «полкой» 5% спектра на частотах от 4,6 до 5,6 Гц. Из этих условий определим коэффициент учета как отношение действующей нагрузки к сниженной (в расчетах используется спектр с 5 % демпфированием в долях критического):

$$F_{Mod} = \frac{0,78g}{0,69g} = 1,13.$$

Предполагая, что нижнее значение ускорения «полки» спектра (на частотах от 4,6 до 5,6 Гц равное 0,6 g) обеспечивает 99 % вероятность превышения, а исходное значение 0,78g обеспечивает 99 % вероятность непревышения (1 % вероятности превышения), получим:

$$\beta_{U_{Mod}} = \frac{1}{2 \cdot 2,33} \ln\left(\frac{0,78g}{0,6g}\right) = 0,056.$$

Сложение собственных форм

Расчеты выполнялись методом динамического анализа с разложением на собственные частоты.

Первой частотой были колебания самой конструктивной колонны вертикального насоса, второй – колебания электродвигателя на опорной конструкции. Следующие формы (более 15 Гц) практически не влияют на реакцию конструкции электродвигателя. Поэтому влияние сложения собственных форм отсутствует:

$F_{MC} = 1.$

Алеаторная неопределенность принята минимальной на уровне:

$\beta_R = 0,05.$

Комбинация компонент землетрясения

Когда используется суммирование компонент по квадратному корню или сложение компонент по правилу (100-40-40) (см. таблицу П.4.1 НП-031-01), предполагается, что получается медианное значение нагрузки:

$F_{ECC} = 1.$

По рекомендации EPRI TR-103959 принимаем $\beta_R = 0,18$.

Итоговый коэффициент реакции оборудования F_{RE}:

$$F_{RE} = F_{QM} \cdot F_D \cdot F_{Mod} \cdot F_{MC} \cdot F_{ECC} = 1,03 \cdot 1,0 \cdot 1,13 \cdot 1 \cdot 1 = 1,16.$$

Характеристики разброса коэффициента реакции оборудования равны:

$\beta_U = \sqrt{0{,}12^2 + 0{,}23^2 + 0{,}056^2} = 0{,}265;$

$\beta_R = 0{,}05.$

Коэффициент реакции сооружения

Составляющие коэффициента: форма спектра, демпфирование, моделирование, суммирование по формам и учет пространственного и асинхронного характера действия внешнего воздействия на сооружение (некогерентность).

Форма спектра

На рассматриваемой частоте 6,81 Гц отношение значения ускорения спектра ответа (5 % от критического демпфирования) на свободной поверхности, использованного при ранее выполненных расчетах от ускорения спектра, полученного после выполнения вероятностного анализа сейсмической опасности и учета локальных характеристик грунтового основания, равно 1,15.

$F_{SS} = 1{,}15.$

По документу EPRI TR-103959 для него:

$\beta_R = 0{,}2;$

$\beta_U = 0{,}16.$

Демпфирование

При нагрузках близких к критическим для опоры насоса, конструкции здания находятся в упругой стадии, поэтому демпфирование, равное 4 % рассматривается как медианное. Разброс вследствие неопределенности был оценен как 0,15.

$F_D = 1{,}0;$

$\beta_U = 0{,}15.$

Моделирование

Формирование модели здания и проведение на ее основе расчетов проводились в соответствии с рекомендациям раздела VI настоящего Руководства по безопасности. Модель здания принималась имеющей медианные характеристики. Варьирование характеристик позволяет оценить разброс по собственным частотам здания для определения $\beta_U = 0{,}1$. Формы колебаний здания насосной не изменялись с изменением входных параметров модели:

$F_{Mod} = 1{,}0;$

$\beta_U = 0{,}1.$

Комбинация собственных форм

Реакцию здания в основном определяет одна собственная форма. Таким образом полученные ранее значения имеют медианную характеристику. Минимальное значение для алеаторного разброса принимается по EPRI TR-103959:

$F_{MC} = 1,0;$

$\beta_R = 0,05.$

Учет пространственного и асинхронного характера действия внешнего воздействия на сооружение (некогерентность)

Здание насосной имеет в плане размеры 27м×55м.

Для частоты 6,81 Гц понижающий коэффициент для корректировки спектра ответа составляет 1,14. Поскольку в проектном расчете он не учитывался, то коэффициент F_{GMI} также составляет 1,14.

Рекомендуется выбирать характеристику эпистемического разброса β_U этого коэффициента, чтобы вероятность превышения значения $F_{GMI} \geq 1$ была крайне малой:

$$\beta_U = \frac{1}{2}\ln(F_m) = \frac{1}{2}\ln(1,14) = 0,065.$$

Итоговый коэффициент реакции сооружения:

$$F_{RS} = F_{SS} \cdot F_D \cdot F_{Mod} \cdot F_{MC} \cdot F_{GMI} = 1,15 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,14 = 1,31;$$

$$\beta_R = \sqrt{0,2^2 + 0,05^2} \approx 0,2;$$

$$\beta_U = \sqrt{0,16^2 + 0,15^2 + 0,1^2 + 0,065^2} = 0,25.$$

Характеристики повреждаемости элемента

Расчетное воздействие на открытой поверхности соответствует максимальному горизонтальному ускорению на свободной поверхности 0,08g.

$$A_m = F_C \cdot F_{RS} \cdot F_{RE} \cdot A_{SSE} = 9 \cdot 1,16 \cdot 1,31 \cdot 0,08\, g = 1,09\, g;$$

$$\beta_U = \sqrt{0,26^2 + 0,265^2 + 0,25^2} = 0,45;$$

$$\beta_R = \sqrt{0^2 + 0,05^2 + 0,25^2} \approx 0,25;$$

$$\beta_C = \sqrt{\beta_U^2 + \beta_R^2} = 0,51;$$

$$HCLPF = A_m \cdot e^{-1,65(\beta_U + \beta_R)} = 0,34$$

или по приближенной формуле для средней (композитной) кривой и условной вероятности отказа 0,01:

$$HCLPF \approx A_m \cdot e^{-2,33\beta_C} = 0,33.$$

Кривые сейсмической повреждаемости представлены на рис. 7.6.

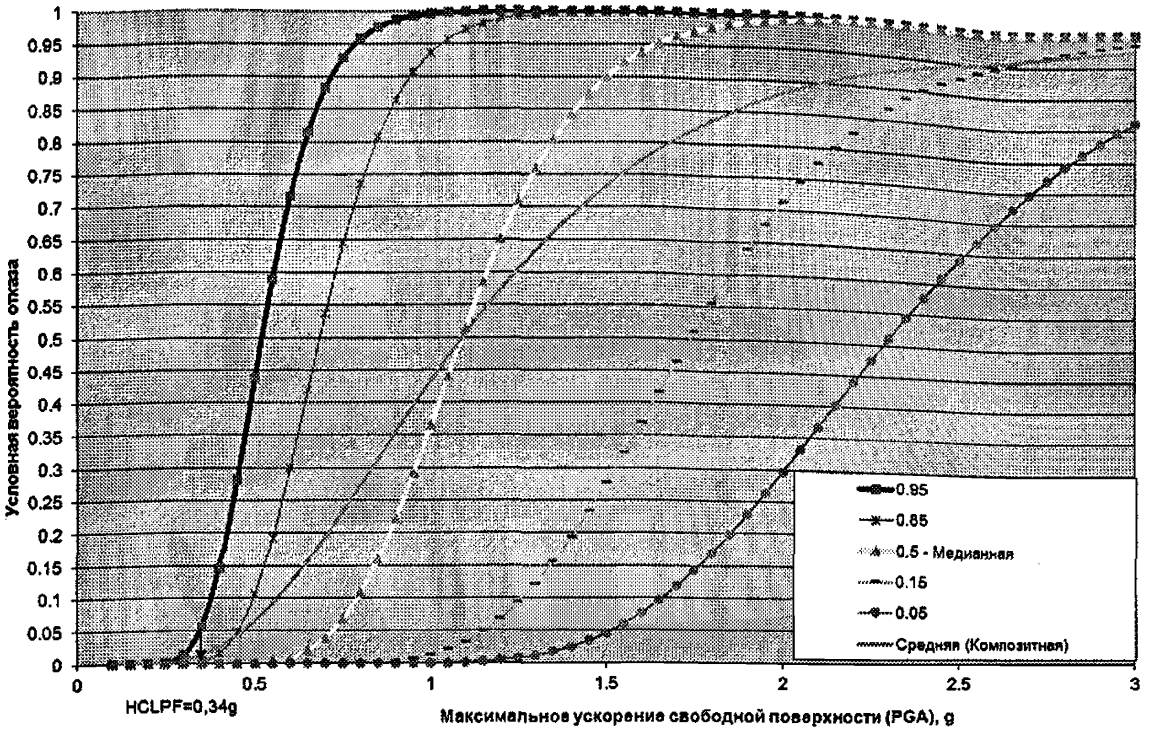


Рис. 7.6. Кривые сейсмической повреждаемости для опорной конструкции электродвигателя

ПРИЛОЖЕНИЕ № 7
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Основные рекомендации к разработке
вероятностного анализа безопасности уровня 1
для блока атомной станции при исходных
событиях, обусловленных сейсмическими
воздействиями», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от 1 февраля 2017 г. № 33

Рекомендуемые подходы к анализу систем, суммарной вероятности тяжелых аварий от сейсмических воздействий и оценке неопределенности

Ниже перечислен состав работ, которые рекомендованы к выполнению в процессе анализа систем и анализа суммарной вероятности тяжелых аварий от сейсмических воздействий и оценки неопределенности.

1) Разработка на основе моделей АП (деревьев событий) и моделей систем (деревьев отказов) из ВАБ уровня 1 для внутренних ИС деревьев событий и деревьев отказов с учетом отказов элементов вследствие сейсмических воздействий.

2) Анализ возможных сейсмических ИС и разработка дерева сейсмических событий. Среди этих событий могут быть выделены:

события, развитие которых приводит к ИС, которые рассматривались в ВАБ для внутренних исходных событий: течи (отказ оборудования первого контура и примыкающих систем), обесточивание (оборудования ОРУ, внешних опор ЛЭП), прочие события, которые могли моделироваться в ВАБ для внутренних ИС (потеря технической воды группы и другие исходные события);

дополнительные события, обусловленные спецификой воздействия: отказы сооружений, оснований, пожары и затопления, летящие предметы, хлыстовые эффекты вследствие разрывов трубопроводов; различающиеся по последствиям отказы зданий и сооружений могут моделироваться на сейсмических деревьях событий (например, отказ здания реакторного отделения → разрыв корпуса реактора, отказ АЗ, отказ здания турбины).

Пример дерева сейсмических ИС приведен на рис. 8.1.

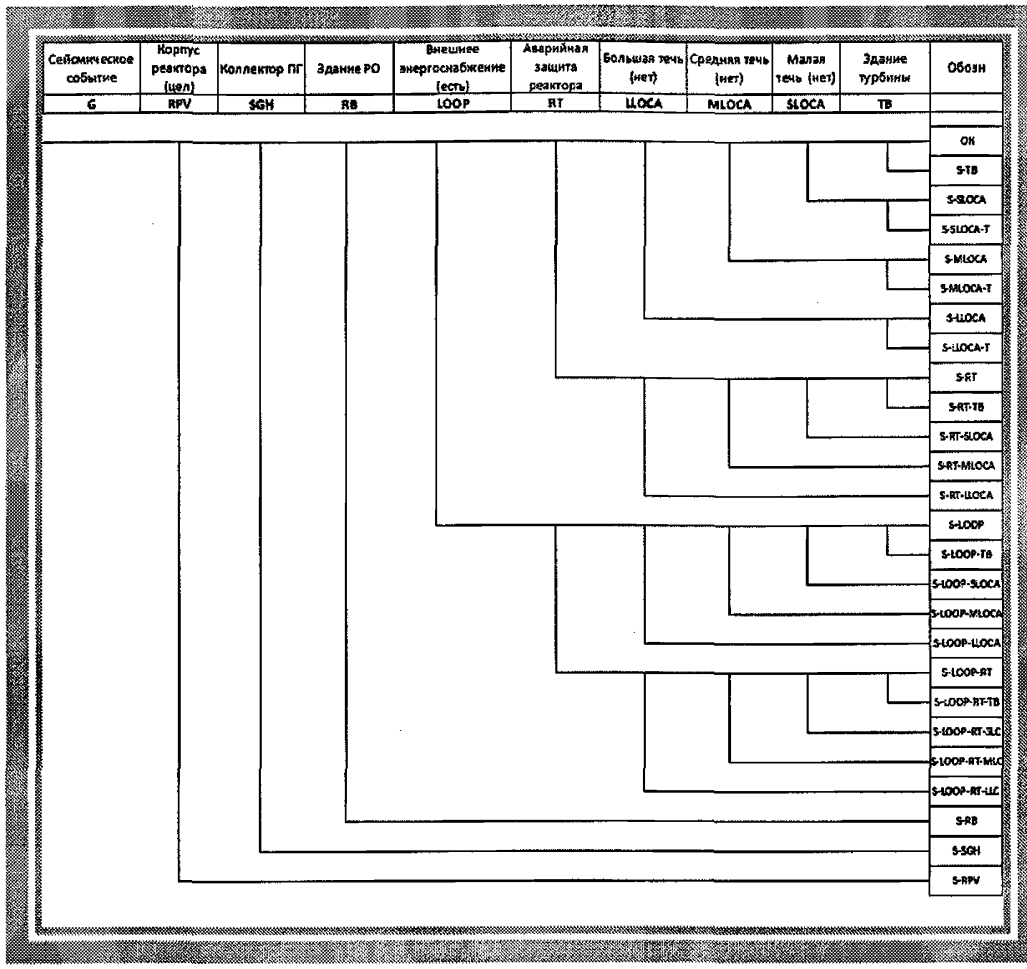


Рис. 8.1. Пример дерева сейсмических ИС

3) Группирование событий по их последствиям: например, события, связанные с отказами ОРУ, группируются как приводящие по последствиям к исходному событию – длительному обесточиванию блока АС. Для определения вероятностей функциональных событий (заголовков дерева сейсмических ИС) могут быть разработаны дополнительные деревья отказов, например, дерево сейсмических отказов элементов реакторной установки, приводящих к событию с малой течью при воздействии с интенсивностью 0,2g на свободной поверхности или дерево отказов строительных конструкций здания реакторного отделения.

4) Разбиение рассматриваемой кривой сейсмической опасности на диапазоны по интенсивности, в которых развитие аварий качественно отличается в связи, например, с появлением новых событий, частоты которых были за пределом уровня отсечения в предыдущем поддиапазоне, а также в связи с переходом некоторых событий в разряд безусловных (например, обесточивание при интенсивных землетрясениях). Для получе-

ния средней оценки вероятности тяжелых аварий рассматривается средняя кривая сейсмической опасности.

5) Расчет частот ИС вследствие сейсмических воздействий для каждого диапазона и частот сейсмических отказов.

Частоты ИС от сейсмических воздействий оцениваются с учетом кривой сейсмической опасности и кривой повреждаемости элемента.

Для диапазона кривой сейсмической опасности (h_i, a_i)...(h_{i+1}, a_{i+1}) выбирается соответствующий по ускорениям диапазон кривой сейсмической повреждаемости элемента (f_i, a_i)...(f_{i+1}, a_{i+1}),

где: h_i, h_{i+1} – значения повторяемости 1/год на кривой сейсмической опасности, соответствующие границам i -диапазона;

a_i, a_{i+1} – значения ускорений свободной поверхности грунта, соответствующие границам i –диапазона;

f_i, f_{i+1} – значения условной вероятности отказов элемента (повреждаемости).

Частота события для n-го элемента $IE_{f_i}^n$ определяется как:

$$IE_{f_i}^n = (h_{i+1} - h_i) \cdot \bar{f}_i,$$

где $\bar{f}_i$ - приведенная условная вероятность для диапазона.

С целью определения приведенной условной вероятности диапазон повторяемости разбивается на интервалы, а приведенная частота определяется как средневзвешенное:

$$\bar{f}_i = \frac{\sum_{m=1}^{100} f_i \Delta h^i{}_m}{\sum_{m=1}^{100} \Delta h^i{}_m}, \qquad \text{где } \Delta h_m{}^i = \frac{(h_i - h_{i+1})}{100},\ m = 1...100.$$

6) В деревья отказов, которые разработаны для внутренних ИС, вносятся изменения для учета последствий сейсмических отказов. В ряде случаев для рассматриваемых систем пересматриваются их границы: в границы системы вводятся опорные конструкции и анкеровка оборудования, трубопроводы, для электрических и управляющих систем дополнительно включаются шкафы, панели, к которым крепятся элементы, ранее рассмотренные в ВАБ для внутренних ИС, а также элементы распределительных систем.

7) Выполняется учет зависимых отказов по общей причине при сейсмических воздействиях. Зависимость связана с тем, что в однотипном оборудовании, расположенном так, что воздействие на него оказывается аналогичным образом (одинаковый или незначительно отличающиеся друг от друга спектры ответа: системы расположены рядом, одна или соседние высотные отметки, одинаковое расположение в осях здания, одинаковые

условия закрепления на отметке, на трубопроводе и т.п.), будут возникать аналогичные характеристики реакции на воздействие. Максимальные характеристики реакции этого оборудования будут совпадать по времени, направлению, и если имеет место отказ какого-либо элемента, то можно предположить и отказ аналогичного.

В практике ранее разработанных ВАБ для сейсмических событий использовались следующие методы учета зависимости по реакции на воздействие:

аналогичные элементы на одной отметке, реагирующие в одном частотном диапазоне спектра ответа, считаются абсолютно зависимыми по реакции на воздействие;

аналогичные элементы на одной отметке, реагирующие в различных частотных диапазонах спектра ответа, имеют коэффициент корреляции по реакции на воздействие, равный 0,5. Отличие от предыдущего случая может заключаться, например, в разных условиях закрепления аналогичных элементов, что изменяет жесткость и соответственно частотные диапазоны реакции;

аналогичные элементы на различных отметках одного и того же здания, но реагирующие в одном и том же частотном диапазоне, имеют коэффициент корреляции по реакции на воздействие равный 0,75;

элементы, установленные вблизи зданий, рассматриваются так, как будто они расположены на нижней отметке (земной поверхности) примыкающего здания;

аналогичные конфигурации трубопроводной арматуры (последовательные или параллельные) из аналогичных элементов имеют коэффициент корреляции по реакции на воздействие, равный 1;

остальные конфигурации считаются независимыми.

При использовании указанного подхода на этапе разработки сейсмического перечня элементов и этапе обхода блока АС рекомендуется выявлять и фиксировать аналогичные элементы оборудования, а также аналогичные условия закрепления, установки, подвеса.

8) Расчет суммарной вероятности тяжелых аварий от сейсмических воздействий выполняется для каждого диапазона кривой сейсмической опасности.

Далее полученные результаты суммируются для всех диапазонов.

9) Для выполнения анализа неопределенности учитываются сочетания данных вероятностного анализа сейсмической опасности и кривых сейсмической повреждаемости для различных уровней доверительной вероятности. Поскольку возможное сочетание кривых опасности и повреждаемости может оказаться крайне велико, для выполнения анализа неопределенности следует использовать специальное программное обеспечение, позволяющее выполнять указанные расчеты.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 8
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Основные рекомендации к разработке
вероятностного анализа безопасности уровня 1
для блока атомной станции при исходных
событиях, обусловленных сейсмическими
воздействиями», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от 1 февраля 2017 г. № 33

Примеры критериев исключения элементов

Ниже приведены примеры критериев для исключения элементов, незначительно влияющих на характеристики сейсмической безопасности блока АС.

1) Элемент может быть исключен, если его граничная сейсмостойкость, полученная непрямым методом, по результатам обхода блока превышает величину, назначенную как пороговую для исключения. Пороговое значение обосновывается с учетом характеристик сейсмической опасности площадки (Раздел IV настоящего Руководства по безопасности) и отсутствия влияния отказа исключаемого элемента на среднее значение вероятности тяжелой аварии. При оценке граничной сейсмостойкости непрямым методом выполняется сопоставление рассматриваемого элемента с классом подобных ему элементов, поведение которых при сейсмических воздействиях известно из опыта.

2) Элемент может быть исключен, если оцененная расчетом характеристика его граничной сейсмостойкости превышает величину, назначенную как пороговую для исключения (см. пункт 1 приложения № 8 к настоящему Руководству по безопасности). При использовании данного критерия требуется оценка граничной сейсмостойкости. При этом может быть выполнена предварительная оценка граничной сейсмостойкости по результатам ранее выполненного расчета по обоснованию сейсмостойкости:

$$HCLPF = \frac{[S] - S_{НЭ}}{S_{МРЗ+НЭ} - S_{НЭ}} \cdot a_{МРЗ},$$

где: $S_{НЭ}$ – нагрузка при нормальных условиях эксплуатации;
$[S]$ – допускаемая нагрузка при МРЗ;
$S_{МРЗ+НЭ}$ – нагрузка от сочетания НЭ+МРЗ;
$a_{МРЗ}$ – максимальное ускорение свободной поверхности при МРЗ в долях ускорения свободного падения.

3) Частота отказа элемента от сейсмических воздействий всего рассматриваемого диапазона более, чем на два порядка ниже среднего значения вероятности тяжелой аварии (требует оценки кривой повреждаемости); может потребовать переоценки, если вероятность тяжелой аварии при разработке ВАБ для сейсмических воздействий менее, чем на два порядка отличается от полной годовой частоты отказа элемента.

Для определения частоты отказа HY_f от сейсмических воздействий рекомендуется использовать формулу полной вероятности:

$$HY_f = -\int_0^\infty \frac{dH(a)}{da} f(a) da = \int_0^\infty \frac{df(a)}{da} \cdot H(a) da,$$

где: $H(a)$ – средняя кривая сейсмической опасности;
$f(a)$ – средняя кривая сейсмической повреждаемости;
a – максимальное горизонтальное ускорение свободной поверхности грунта.

При выполнении численного интегрирования пределы ноль и бесконечность в приведенной формуле могут быть заменены на приблизительные значения a_{min} и a_{max} соответственно. Тогда, если кривую сейсмической опасности можно представить в виде соотношений (6.9), (6.10) из приложения № 5 к настоящему Руководству по безопасности, то для определения HY_f можно воспользоваться аппроксимирующей формулой:

$$HY = \frac{H_0 \cdot e^{\frac{1}{2}(K_H \cdot \beta_C)^2}}{\left(\frac{A_m}{A_0}\right)^{K_H}},$$

где: (H_0, A_0) – некоторая точка со средней кривой сейсмической опасности, например, соответствующая повторяемости $H_0 = 10^{-4}$ 1/год;
A_m – см. приложение № 6 настоящего Руководства по безопасности.

Формулы (6.9) и (6.10) из приложения № 5 к настоящему Руководству по безопасности не всегда обеспечивают хорошую аппроксимацию кривой сейсмической опасности. Поэтому предпочтительным вариантом является выполнение численного интегрирования для получения HY_f.

Пример

Аппроксимация средней кривой сейсмической опасности имеет показатели $K_1 = 2{,}32\ 10^{-10}$ и $K_H = 4{,}18$, ускорению $A_0 = 0{,}12g$ соответствует частота $H_0 = 1.9\ 10^{-6}$ 1/год.

Тогда средней кривой сейсмической повреждаемости с параметрами $A_m = 0{,}53g$ и $\beta_c = 0{,}4$ соответствует значение полной частоты $HY_f = 1{,}57\ 10^{-8}$ 1/год.

Если, к примеру, ожидается, что вероятность тяжелых аварий от сейсмических событий составит 20 % от суммарного допустимого значения 10^{-5} 1/год для всех ИС, то полученное значение HY_f более чем на два порядка ниже и может быть исключено.

Руководство по безопасности при использовании атомной энергии

Основные рекомендации к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для блока атомной станции при исходных событиях, обусловленных сейсмическими воздействиями

РБ-123-17

Официальное издание
Ответственный за выпуск Синицына Т.В.
Верстка выполнена в ФБУ «НТЦ ЯРБ» в полном соответствии с приложением к приказу Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 1 февраля 2017 г. № 33
Подписано в печать 20.02.2017

ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ») является официальным издателем и распространителем нормативных актов Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.04.06 № 384) а также официальным распространителем документов МАГАТЭ на территории России.
Тираж 100 экз.
Отпечатано в ФБУ «НТЦ ЯРБ»
Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5

РЕГИСТР ИСО 9001

Система менеджмента ISO 9001:2008 TÜVRheinland www.tuv.com ID 9105068867

Данный продукт изготовлен компанией, система менеджмента качества которой сертифицирована в TUV Rheinland

Система менеджмента качества ФБУ «НТЦ ЯРБ» сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта ISO 9001:2008 и межгосударственного стандарта ГОСТ ISO 9001-2011

gost.e-ecolog.ru