

На правах рукописи

ПЕТРЕНКО

Андрей Валерьевич

**ДИНАМИКА СООРУЖЕНИЙ
И ОБОРУДОВАНИЯ АЭС ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Специальность 05.23.17 – «Строительная механика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2005

Работа выполнена в ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» (Санкт-Петербург)

Научный руководитель:

кандидат техн. наук, доцент

БИРБРАЕР Адольф Никитич

Официальные оппоненты:

доктор техн. наук, профессор

Лалин Владимир Владимирович

кандидат техн. наук, вед. научн. сотр.

Цейтлин Борис Вениаминович

Ведущая организация:

ФГУП «Атомэнергопроект» (Москва)

Защита диссертации состоится 12 апреля 2005 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.15 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ПГК, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан “___” марта 2005 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор техн. наук, профессор

Андреев А.Е.

Основные сокращения, использованные в тексте автореферата:

РО – реакторное отделение	ПА – поэтажная акселерограмма
УС – удар самолета	ПС – поэтажный спектр ответа
СК – система координат	ВУВ – воздушная ударная волна
АЭС – атомная электростанция	ККСК – квадратный корень суммы квадратов
ЭВДВ – экстремальные внешние динамические воздействия	
ЛСТ – линейно-спектральная теория сейсмостойкости	

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Важнейшей задачей при проектировании и эксплуатации атомных электростанций (АЭС) является обеспечение их безопасности, надежности и экологической приемлемости при всех режимах эксплуатации, в том числе при экстремальных внешних динамических воздействиях (ЭВДВ) природного и техногенного характера. Для этого необходимо обеспечить как прочность сооружений, так и работоспособность находящегося в них оборудования, отвечающего за радиационную безопасность. Одним из наиболее опасных и интенсивных природных воздействий является землетрясение. Наиболее опасными техногенными воздействиями считаются удар падающего самолета (УС) и воздушная ударная волна (ВУВ).

В последнее время для расчетов как сооружений, так и находящегося в них оборудования АЭС при ЭВДВ используются детальные математические модели, отражающие не только поведение конструкций в целом, но и локальные эффекты. С помощью таких моделей обнаруживаются неизвестные ранее явления и закономерности, влияющие на безопасность АЭС и требующие изучения.

Одним из примеров этого является возникновение статистической зависимости компонент сейсмических поэтажных акселерограмм сооружений (ПА). Ее учет влияет на задание сейсмического воздействия при расчете оборудования и трубопроводов АЭС и на их напряженно-деформированное состояние.

Другой пример связан с расчетами на ЭВДВ сооружений и находящегося в них оборудования АЭС по линейно-спектральной теории (ЛСТ). Она разработана более полувека назад для простейших динамических моделей. Поэтому ее применимость и ограничения при современном уровне детального проектирования нуждаются в дополнительной проверке и обосновании, в особенности для реализации крупных проектов строительства АЭС последних лет.

В настоящее время актуальна задача продления ресурса энергоблоков действующих АЭС. При этом часто возникает проблема обоснования их безопасности при более интенсивных ЭВДВ, чем принималось при проектировании. В связи с этим нужно, во-первых, определить запасы прочности, заложенные в конструкциях благодаря применявшимся ранее методам проектирования и расчета, например ЛСТ. Во-вторых, необходимо обосновать безопасность АЭС при более высоких уровнях ЭВДВ. В-третьих, следует разрабатывать новые эффективные методы обеспечения безопасности сооружений и находящегося в них оборудования при ЭВДВ. В частности, использование высоковязких демпферов может значительно сократить затраты на перепроектирование АЭС на более высокий уровень ЭВДВ.

Диссертация посвящена решению названных выше проблем, что и определяет ее актуальность.

Цель диссертационной работы

Совершенствование методики расчета сооружений и находящегося в них оборудования АЭС при действии экстремальных внешних динамических воздействий (ЭВДВ). Разработка и обоснование эффективности метода снижения вынужденных колебаний сооружений с помощью высоковязких демпферов при ЭВДВ.

Задачи исследования

1. Анализ методов суммирования модальных откликов в линейно-спектральной теории сейсмостойкости для проектирования сейсмостойких АЭС при использовании детальных пространственных математических моделей: сравнение точности методов, проверка выполнения основополагающих допущений, определение пределов применимости.

2. Проверка выполнения основной гипотезы, использующейся при проектировании сейсмостойких АЭС: о статистической независимости компонент акселерограмм на грунте и поэтажных акселерограмм при землетрясении. Изучение возможных причин невыполнения этой гипотезы и их зависимости от реализации землетрясения и свойств системы «здание – грунтовое основание».

3. Изучение зависимости колебаний сооружений АЭС от вариации жесткости грунта при землетрясении, ударе самолета и взрывной ударной волне.

4. Разработка и обоснование эффективности применения высоковязких демпферов, связывающих различные структурные элементы сооружений АЭС, для снижения вынужденных колебаний сооружений при землетрясении, ударе самолета и взрывной ударной волне.

Методы исследования

Решение поставленных задач достигнуто с помощью численного моделирования и анализа колебаний и напряженно-деформированного состояния сооружений АЭС и находящегося в них оборудования на основе детальных пространственных моделей при экстремальных внешних динамических воздействиях; путем аналитического исследования статистической зависимости компонент акселерограмм землетрясений; посредством вероятностного анализа 1054 записей землетрясений, зарегистрированных за последние 30 лет на территории Европы.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Проведен качественный и количественный сравнительный анализ всех методов суммирования модальных откликов линейно-спектральной теории, предусмотренных отечественными, международными и зарубежными нормами проектирования АЭС, на базе рассмотрения детальных пространственных моделей двух зданий реакторных отделений и типового оборудования АЭС (трубопровод, теплообменник и цилиндр низкого давления турбоагрегата). Дана оценка точности всех методов и основополагающего для них уравнения Розенблюэта, сформулированы рекомендации об их применимости.

2. Проверена основная гипотеза, используемая при проектировании АЭС: о независимости компонент акселерограмм на грунте при землетрясении. Аналитически скорректирован нормативный критерий выполнения этой гипотезы с учетом зависимости от используемой системы координат, а также определена оценка вероятности выполнения гипотезы путем обработки 1054 записей землетрясений, зарегистрированных за последние 30 лет в Европе.

3. На примере двух зданий реакторных отделений и машинного зала АЭС установлена возможность статистической зависимости компонент поэтажных акселерограмм, основные причины этого явления и степень влияния на него реализации сейсмического процесса и грунтовых условий. Продемонстрировано влияние такой зависимости на напряженно-деформированное состояние типового оборудования АЭС, и даны рекомендации по ее учету.

4. На примере здания реакторного отделения исследована зависимость интенсивности колебаний сооружения от жесткости грунта при основных видах экстремальных внешних воздействий на основе поэтажных акселерограмм и спектров ответа. Установлена необходимость учета вариации жесткости не только при землетрясении, но и при ударе самолета и взрывной ударной волне.

5. На примере типового здания реакторного отделения АЭС разработан и обоснован эффективный метод снижения вынужденных колебаний сооружения при экстремальных внешних воздействиях путем установки высоковязких демпферов, связывающих различные структурные элементы сооружения.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена сопоставлением с аналитическими и экспериментальными данными, опубликованными в технической литературе, а также использованием надежных и апробированных вычислительных программ и методов моделирования. Для расчетов колебаний и напряженно-деформированного состояния сооружений с находящимся в них оборудованием применялся конечно-элементный программный комплекс SOLVIA фирмы SOLVIA ENGINEERING AB (Швеция), проходящий в настоящее время аттестацию в Госатомнадзоре РФ.

На защиту выносятся:

1. Результаты качественного и количественного сравнительного анализа методов суммирования модальных откликов в линейно-спектральной теории сейсмостойкости, рекомендованных отечественными и зарубежными нормами проектирования АЭС, при использовании детальных пространственных моделей зданий и оборудования; рекомендации о применимости каждого метода.

2. Обоснование гипотезы о статистической независимости компонент сейсмических акселерограмм на грунте, используемой при проектировании АЭС, с помощью: а) корректировки критерия выполнения гипотезы с учетом используемой системы координат; б) оценки вероятности выполнения гипотезы по скорректированному критерию.

3. Доказательство возможности возникновения статистической зависимости компонент поэтажных акселерограмм, а также установленные причины этого явления и влияние на него реализации сейсмического процесса и грунтовых условий. Значимость такой зависимости с точки зрения напряженно-деформированного состояния типового оборудования АЭС, рекомендации по ее учету.

4. Результаты исследования зависимости интенсивности колебаний сооружений АЭС от жесткости грунта при землетрясении, ударе самолета и взрывной ударной волне; рекомендации по учету грунтовых условий при проектировании АЭС с учетом рассмотренных воздействий.

5. Применение высоковязких демпферов, связывающих различные структурные элементы сооружений; качественное и количественное обоснование его эф-

фективности для снижения вынужденных колебаний сооружения при экстремальных внешних воздействиях.

Внедрение результатов

Результаты исследований методов суммирования модальных откликов в линейно-спектральной теории сейсмостойкости и влияния грунтовых условий на поэтажные спектры при землетрясении, ударе самолета и взрывной ударной волне использованы ФГУП «Атомэнергопроект» (Москва) и ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» (СПб) при проектировании АЭС.

Результаты исследований по использованию высоковязких демпферов внедрены ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» при разработке методик их применения.

Апробация работы

По результатам исследований сделаны девять докладов на конференциях:

- Семинар «Сейсмостойкость и сейсмозащита зданий и сооружений», заседание секции «Строительная механика» Дома ученых им. М. Горького РАН, ноябрь 2004, С-Петербург;
- Международный симпозиум «Сейсмическая переоценка существующих АЭС, МАГАТЭ, Вена, август 2003 (два доклада);
- 17-ая Международная Конференция «Структурная механика в реакторостроении» (SMIRT), Прага, август 2003;
- Семинар ЦНИИСК им. Кучеренко «Совершенствование и развитие нормативной базы по сейсмостойкому строительству», Москва, апрель 2003;
- V-я Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию с международным участием, Сочи, сентябрь 2003 (три доклада);
- Совещание-семинар МПС и ЖКХ Республики Алтай в соответствии с ФЦП «Сейсмотебезопасность территории России», Горно-Алтайск, январь 2004.

Публикация результатов

Материал диссертации опубликован в девяти научных трудах.

Структура и объем работы

Диссертация содержит 203 страницы машинописного текста, 161 рисунок и 31 таблицу. Работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Библиографический список включает 115 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы тема и задачи исследования, актуальность работы, показаны ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

Первая глава представляет собой обзор и анализ литературы по теме диссертации, на основе которых сформулированы задачи исследования.

Теория сейсмостойкости развивалась на протяжении всего XX в. В ее создании принимали участие многие ученые зарубежных стран: М. Био, Дж. Блюм, Н. Ньюмарк, Н.Мононобе, Ф.Омори, Э.Розенблюэт, Дж.Хаузнер и др. Большой вклад внесли также ученые бывшего СССР: И.И. Гольденблат, В.К. Егупов, К.С. Завриев, И.Л. Корчинский, С.В. Медведев, А.Г. Назаров, Ш.Г. Напетваридзе, Н.А. Николаенко, С.В. Поляков, А.П. Сеницын и др.

Важнейшим шагом в развитии методов сейсмических расчетов сыграло появление линейно-спектральной теории сейсмостойкости (ЛСТ), основанной на использовании спектров ответа, предложенных М.А. Био и Х. Беньоффом. В работе дана общая оценка современного состояния ЛСТ. На основе научных работ Э. Розенблюэта, Э. Ванмарке, А. Гупты, А. Дер Керигяна, П. Мертенса и др., а также российских и зарубежных нормативных документов сформулированы основные требования, предъявляемые в настоящее время к сейсмическим расчетам сооружений и находящегося в них оборудования по ЛСТ.

Существует несколько проблем, связанных с применением ЛСТ. Первая касается методов суммирования модальных откликов. В настоящее время все методы, используемые в нормах ведущих стран для проектирования оборудования, систем и сооружений АЭС, основаны на уравнении Розенблюэта. Такими методами являются: «квадратный корень из суммы квадратов» (ККСК), «метод 10%», «Группировки», «Двойных сумм», «СГС», метод Гупты, упрощенные методы Гупты. Но базисное уравнение Розенблюэта было получено как приближенное, и само нуждается в обосновании и анализе точности.

Другая проблема связана со статистической зависимостью компонент сейсмических акселерограмм. При расчете по ЛСТ с помощью методов суммирования модальных откликов вычисляются сейсмические отклики системы на каждую из трех компонент сейсмического воздействия, которые затем необходимо сложить. При этом общепринято считать отклики статистически независимыми, что регламентировано нормами проектирования АЭС. Исследования записей землетрясений показывают, что на поверхности грунта компоненты сейсмических колебаний дей-

ствительно можно считать статистически независимыми. Но, проходя через упругую систему (здание), акселерограммы видоизменяются, и факт статистической независимости компонент поэтажных акселерограмм (ПА) требует проверки. Отметим, что предположение о такой независимости используется также при «генерировании» искусственных ПА с использованием поэтажных спектров ответа (ПС) для последующего расчета оборудования методом интегрирования уравнений движения. Поэтому необходимо оценить влияние возможной статистической зависимости компонент ПА на сейсмостойкость оборудования, рассчитанного как по ЛСТ, так и путем непосредственного интегрирования уравнений движения.

Еще одна проблема связана с зависимостью интенсивности колебаний сооружений от характеристик грунтового основания. Общеизвестно его сильное влияние при сейсмическом воздействии. В соответствии с рекомендациями, данными в работах Дж. Стивенсона и других исследователей, а также нормами США, при проектировании АЭС при землетрясении следует учесть три варианта модуля сдвига грунта: средний и две его вариации. Но при таких экстремальных внешних динамических воздействиях (ЭВДВ), как удар самолета (УС) и взрывная ударная волна (ВУВ), подобных рекомендаций нет. Распространено мнение, что в силу высокочастотного характера этих воздействий влияние вариации грунтовых условий на ПС незначительно, и можно ограничиться рассмотрением «средних» грунтов. Такая точка зрения требует проверки.

В настоящее время, помимо методов обеспечения сейсмостойкости сооружений путем увеличения их несущей способности, часто применяются системы сейсмозащиты, снижающие инерционные нагрузки при землетрясении. Таким системам посвящены работы Я.М. Айзенберга, Т.А. Белаш, В.С. Беляева, Ф.Д. Зеленкова, Б.Г. Коренева, И.Л. Корчинского, В.В. Назина, В.С. Полякова, О.А. Савинова, В.И. Смирнова, А.М. Уздина, Ю.Д. Черепинского и других авторов.

Одним из перспективных направлений сейсмозащиты является применение элементов с повышенным демпфированием – высоковязких демпферов «ВД», разработанных в ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» и проверенных совместно с фирмой GmbH «GERB» и компанией Ishikawadzima Narima Heavy Industries Co. Они широко используются при обеспечении сейсмостойкости трубопроводов.

Предложено В.В.Костаревым использовать такие демпферы в типовом здании реакторного отделения (РО) АЭС, связав с их помощью защитную оболочку с внутренними конструкциями, с целью снижения интенсивности колебаний здания,

а также усилий в несущих конструкциях. Такое решение требует качественного и количественного обоснования.

На основании обзора литературы и анализа состояния вопроса, выполненных в главе 1, сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена анализу действующих нормативных методов суммирования модальных откликов при расчетах по ЛСТ. Их целью является вычисление сейсмического отклика R системы на одну компоненту землетрясения с учетом корреляции между собственными формами. Все рассматриваемые методы являются аппроксимацией уравнения Розенблюэта с коэффициентами корреляции e_{ij} :

$$R = \left(\sum_{i=1}^n R_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n 2e_{ij} R_i R_j \right)^{1/2}, \text{ где } e_{ij} = \frac{1}{S_i S_j} \frac{1}{T} \int_0^T R_i(t) R_j(t) dt, \quad (1)$$

n – число учитываемых форм, T – длительность колебаний, $R_i(t)$ и $R_j(t)$ – отклики форм i и j , а S_i, S_j – их среднеквадратические отклонения. Поскольку уравнение изменения модального отклика системы аналогично уравнению движения линейного осциллятора, то для вычисления коэффициентов корреляции e_{ij} модальных откликов можно рассматривать пары линейных осцилляторов. Если зафиксировать в формуле (1) частоту i -й формы и варьировать частоту j -й формы, то получим так называемые *функции коэффициентов корреляции*. С их помощью в диссертации на

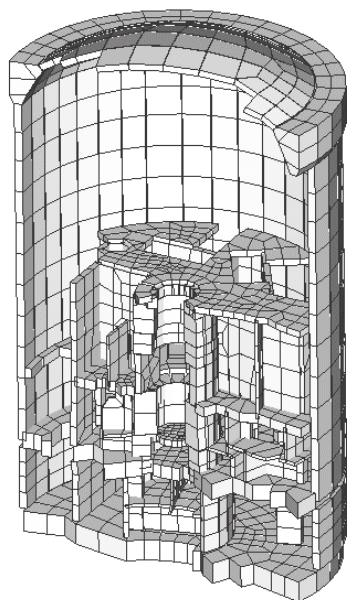


Рис. 1 Модель РО № 1

примере записей 5 известных землетрясений выделены основные факторы, влияющие на взаимную корреляцию модальных откликов. Полученные функции сравнивались с функциями коэффициентов корреляции каждого из методов суммирования, что позволило сделать качественные выводы об их преимуществах и недостатках.

Для проверки сделанных выводов был проведен сейсмический расчет сооружений и оборудования АЭС: двух типовых зданий РО, трубопровода, теплообменника, цилиндра низкого давления турбоагрегата (рис. 1-3, б). Использовались акселерограммы и соответствующие им спектры отклика. Учитывались формы колебаний систем с частотами вплоть до частоты ускорения нулевого периода.

В качестве отклика в системах оценивались погонные усилия и реакции для зданий, реакции для трубопровода и эквивалентные напряжения для обо-

Табл. 1. Разброс ошибок погонной силы по ЛСТ по сравнению с интегрированием по акселерограмме

Метод	Ошибка, %	
	Max	Min
ур. Розенблюэта	38	-15
«ККСК»	574	-55
«10%»	861	-20
«Группировка»	860	-45
«Двойные суммы»	862	-19
«СQC»	55	-22
метод Гупты	131	-20

вертикальное сейсмическое воздействие определил диапазон разброса ошибок методов ЛСТ в определении вертикальной погонной силы в стенах по сравнению с интегрированием по акселерограмме землетрясения (табл.1).

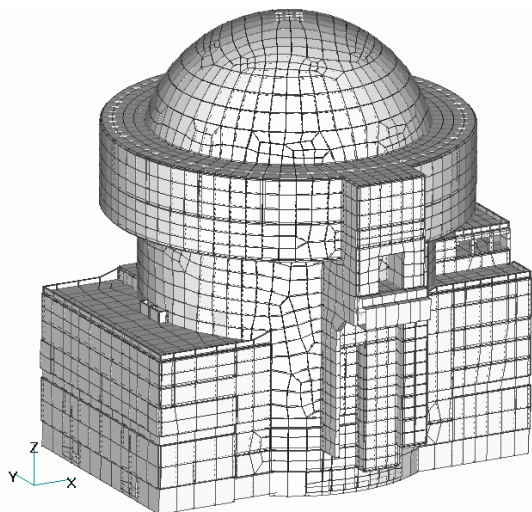


Рис. 2 Модель РО № 2

рудования. Отклики в рамках ЛСТ были определены с помощью базисного уравнения Розенблюэта, а также методов «ККСК», «10%», «Группировки», «Двойных сумм» (со знаком модуля), СQC, метода Гупты, упрощений метода Гупты с использованием методов «10%» и «Группировки». Для оценки точности они сравнивались с результатами, полученными модальным интегрированием уравнений движения. В частности, расчет РО №1 АЭС на

Проведенный анализ результатов сейсмических расчетов позволил определить точность базисного уравнения Розенблюэта, лежащего в основе всех рассматриваемых методов ЛСТ (неконсервативная ошибка до -24%), а также показал необходимость учета «высших» форм колебаний, не находимых явно (они давали до 95% сейсмического отклика). При этом основными факторами, определяющими отклик системы, оказались демпфирование и распределение энергии

сейсмического процесса по частоте, а учет длительности землетрясения при заданном спектре ответа был не существенен. Метод «10%» в рассмотренных системах дал в целом консервативные результаты, но они в ряде случаев были в несколько раз завышенными (ошибка до 861%). Упрощенный метод Гупты с методом «10%» не уменьшил консерватизм метода «10%». Метод «Двойных сумм» со знаком модуля был излишне консервативен, а методы «Группировки», «СQC» и «ККСК» в ряде случаев привели к значительным неконсервативным ошибкам, и использовать их не рекомендуется. С учетом всех расчетов установлено, что метод Гупты дал наилучшие результаты, наиболее близкие к уравнению Розенблюэта и

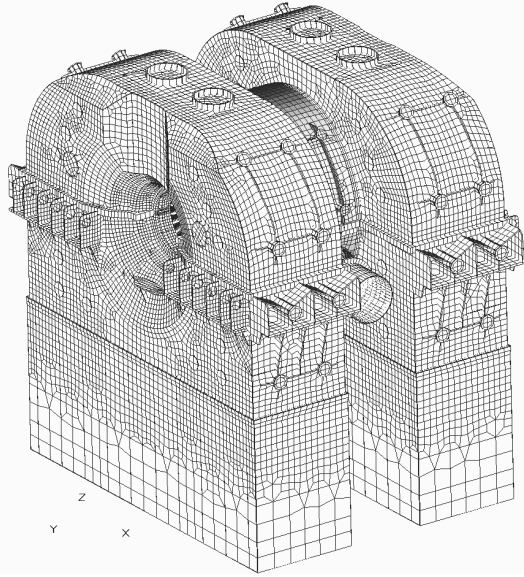


Рис. 3 Цилиндр низкого давления турбоагрегата АЭС

расчету интегрированием на акселерограмму.

В третьей главе проверяется выполнение основной гипотезы, используемой при проектировании сейсмостойких АЭС: о независимости компонент акселерограмм на грунте и поэтажных акселерограмм при землетрясении. В настоящее время принято считать, что компоненты землетрясения статистически независимы или слабо зависимы. Известно, что это справедливо, если одна из компонент записана в направлении на эпицентр, другая – горизонтально и перпендикулярно первой, а третья – вертикально. Но эпицентры землетрясений расположены случайным образом по отношению к направлениям записи на сейсмостанциях, и неясно, останутся ли компоненты акселерограммы статистически независимыми при переходе к иной системе координат (СК).

Как мера статистической зависимости между компонентами акселерограммы используется коэффициент корреляции:

$$r_{rs} = \frac{1}{d_r d_s} E \{ (x_r - m_r)(x_s - m_s) \}, \quad (2)$$

где $r, s = \{x, y, z\}$, $r \neq s$; $E\{ \}$ – символ математического ожидания; m_r и m_s – математические ожидания случайных величин ускорений x_r и x_s соответственно; d_r и d_s – их среднеквадратические отклонения. Согласно нормам, для сейсмических акселерограмм на грунте должен выполняться критерий:

$$|r_{rs}| < 0.3 \quad (3)$$

Принято использовать СК с двумя горизонтальными осями X, Y в плоскости поверхности Земли, являющейся границей упругого полупространства, и вертикальной осью Z , т.е. нормалью к ней. Рассматривая наряду с исходной СК (XYZ) другую (UVZ), полученную поворотом на угол α вокруг оси Z (рис.4), были найдены выражения для максимума модуля коэффициента корреляции:

а) для любых двух горизонтальных компонент акселерограммы:

$$\max_a r_{uv} = \frac{\sqrt{(d_x^2 - d_y^2)^2 + 4r_{xy}^2 d_x^2 d_y^2}}{(d_x^2 + d_y^2)}, \quad (4)$$

б) для горизонтальной и вертикальной компонент акселерограммы:

$$\max_a |r_{uz}| = \frac{|r_{zx} + r_{yz}\Omega|}{\sqrt{1 + 2r_{xy}\Omega + \Omega^2}},$$

где
$$\Omega = \frac{r_{yz} - r_{xy}r_{zx}}{r_{zx} - r_{xy}r_{yz}} \quad (5).$$

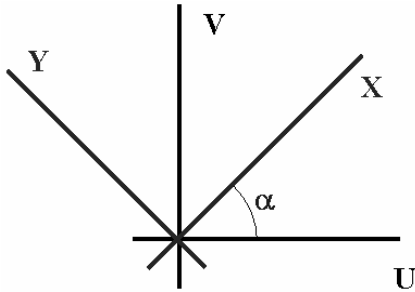


Рис.4. Исходная система координат и повернутая вокруг вертикальной оси

Тем самым показано, что нормативный критерий независимости компонент может удовлетворяться в исходной СК, но одновременно нарушаться в некоторой другой СК. Более обоснованным является использование усовершенствованного критерия, сводящегося к формулам (4, 5).

Для проверки выполнения нормативного критерия независимости компонент и обоснования его усовершенствованного вида были изучены записи из Европейской базы данных о сильных землетрясениях, произошедших на территории Европы за последние 30 лет (1054 шт.). С их помощью найдены плотности вероятности модулей коэффициентов корреляции, и вычислена оценка вероятности выполнения нормативного критерия (табл. 2):

Табл. 2. Оценка вероятности независимости компонент землетрясения

Система координат	r_{xy}	r_{zx}	r_{yz}
Исходная (действующий критерий)	0.84	0.84	0.88
Соответствующая максимальной корреляции (усовершенствованный критерий)	0.64	0.73	0.73

Проведенные исследования подтвердили обоснованность гипотезы о статистической независимости компонент сейсмических колебаний на грунте и использование усовершенствованного вида нормативного критерия.

Однако эту гипотезу принято распространять и на сейсмические колебания внутри зданий и сооружений, что, в частности, лежит в основе ЛСТ. В работе указан ряд причин, по которым даже статистически независимые компоненты исходных акселерограмм, записанных на грунте, пройдя через упругую систему (здание), могут стать статистически зависимыми. Все они сводятся к тому, что сейсмическое воздействие в одном глобальном направлении вызывает отклик конструкции в другом глобальном направлении.

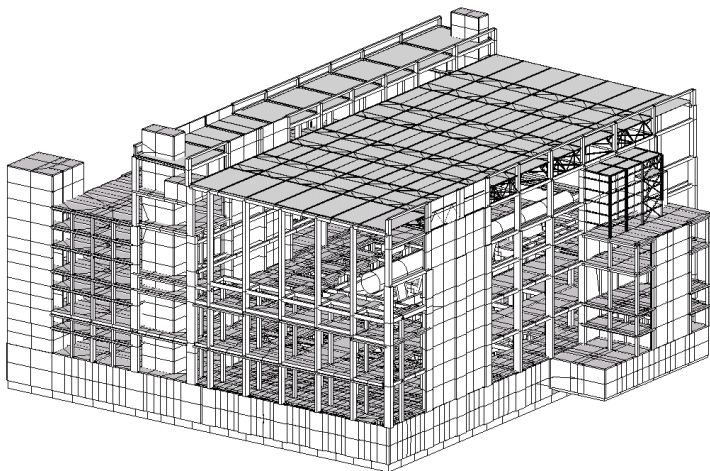


Рис. 5 Модель машинного зала АЭС

Для анализа возможности возникновения сильно зависимых компонент ПА были проведены сейсмические расчеты двух различных зданий РО и машинного зала. Для них были разработаны детальные математические модели (рис. 1, 2, 5). Землетрясение задавалось с помощью искусственных акселерограмм. Результа-

ты проведенных расчетов подтвердили возможность возникновения сильно зависимых компонент ПА и предполагаемые причины этого явления. Соответствующий модуль коэффициента корреляции в некоторых случаях достигал 0.8.

На примере здания РО №2 было показано, что эффект зависимости компонент ПА не вызван особенностями использованной расчетной акселерограммы. А для

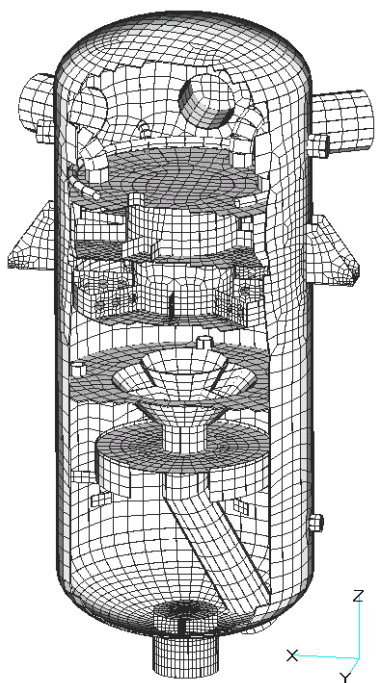


Рис. 6. Модель теплообменника

изучения влияния на данный эффект грунтовых условий было рассмотрено пять вариантов жесткости грунта (от очень мягкого до скалы). Оказалось, что при всех жесткостях основания в здании РО существуют зоны, где модуль коэффициента корреляции компонент ПА достигает значений 0.7-0.8. Для мест установки наиболее ответственного оборудования (реактора, главных циркуляционных насосов, системы аварийного охлаждения зоны и системы пассивного отвода тепла) было получено, что критерий независимости компонент ПА нарушался в 34% случаев.

Посредством сейсмического анализа оборудования с различными динамическими характеристиками – жестких систем (первая собственная частота выше 20 Гц); гибкой трубопроводной системы; подогревателя низко-

давления АЭС (рис. 6) – показано, что при оценке напряженно-деформированного состояния оборудования при землетрясении без учета статистической зависимости компонент ПА можно получить существенную неконсервативную ошибку (до 70%). Но действующие нормы влиянием этого фактора пренебрегают.

Были выработаны рекомендации по учету данного явления при проектировании сейсмостойких АЭС.

В четвертой главе на примере здания РО №2 (рис. 2) изучена зависимость интенсивности вынужденных колебаний конструкций АЭС от жесткости грунта при землетрясении, УС и ВУВ. Рассмотрены пять вариантов грунта – от очень мягкого до скалы. Использовались акселерограмма землетрясения, закон изменения силы во времени при ударе самолетов *Lear Jet* и *Cessna*, зависимость от времени давления на поверхности здания при ВУВ.

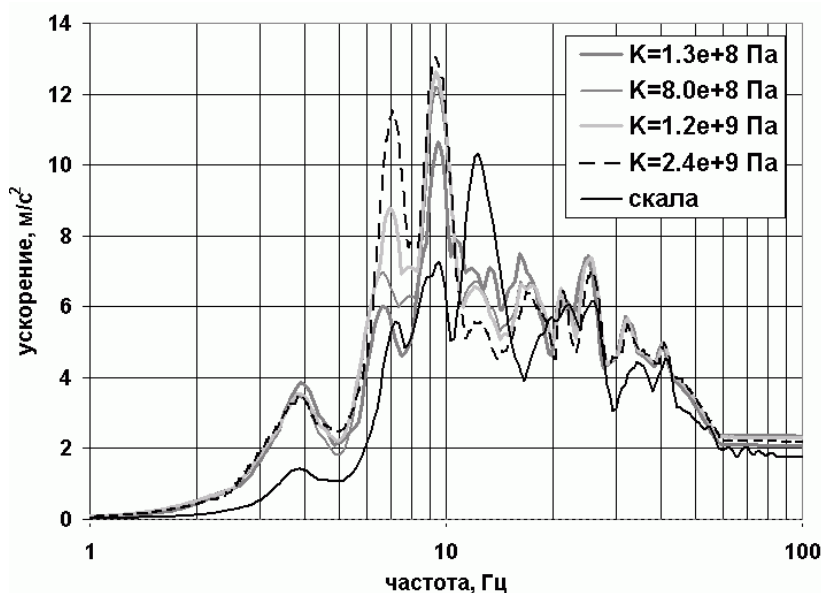


Рис. 7 ПС герметичного объема при ВУВ (горизонталь, демпфирование 2%, К – модуль сдвига грунта)

В пятой главе на примере типового здания РО № 1 (рис. 1) изучено предложенное В.В. Костаревым применение демпферов «ВД», связывающих различные структурные элементы здания (рис. 8), для снижения ответных колебаний при землетрясении, УС и ВУВ. Учитывались два варианта грунта: мягкий и скальный.

Для общей оценки эффективности работы демпферов была рассмотрена простейшая система, состоящая из двух линейных осцилляторов, моделирующих систему «оболочка – внутренние конструкции РО». Осцилляторы соединялись связью, эквивалентной некоторому числу демпферов «ВД». Варьируя отношения масс и частот осцилляторов, изучалась эффективность связи при разных уровнях демпфирования в системе с точки зрения снижения максимального ускорения одного из осцилляторов. Установлена возможность снижения колебаний конструкции при соединении не только с более жесткой, но и с более податливой системой.

Анализ ПС, определяющих колебания сооружения и инерционные нагрузки на оборудование, выявил сильное влияние жесткости грунта не только при сейсмическом воздействии, но и при УС и ВУВ (рис. 7). Следовательно, вариацию жесткости основания нужно учитывать не только при расчетах на землетрясение, но и при УС и ВУВ.

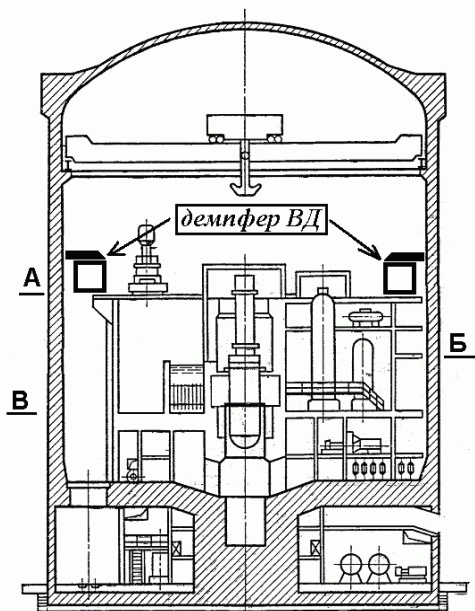


Рис. 8 Вариант демпферной связи

С помощью стержневой и детальной моделей здания показана принципиальная эффективность использования демпферов, и найдено их оптимальное количество, исходя из двух требований: 1 – снижения ответного ускорения первого осциллятора, 2 – снижения передаваемой ему сейсмической энергии. Оптимальное число демпферов составило 90 штук.

Был проведен сравнительный анализ колебаний и внутренних усилий здания, а также нагрузок на оборудование как без демпферов, так и при выбранном их числе, при землетрясении, УС и ВУВ. Эффективность высоко-

вязких демпферов «ВД» была наибольшей в случае скального основания.

Были рассмотрены два удара самолета типа *Phantom* в различные точки здания. Установлено, что для отметок внутренних конструкций введение связи из 90 демпферов приводит к снижению максимальных ускорения на ПС и максимальные ускорения во времени. При этом, однако, ПС становятся более пологими, и их максимумы смещаются, так что в некоторых диапазонах частот они оказались выше исходных ПС.

Воздействие ВУВ задавалось изменяющимся во времени давлением, полученным из решения задачи об обтекании взрывной волной цилиндра с заданным радиусом. При этом введение демпферной связи увеличивало инерционную нагрузку на оборудование на отдельных перекрытиях РО.

На основе полученных выше данных для здания РО на скальном основании построены обобщенные расширенные огибающие ПС от землетрясения, УС и ВУВ (рис. 9). Максимальные ускорения для отметок приведены в табл.3. Как видно, при установке демпферов ускорения, т.е. инерционные нагрузки на оборудование, существенно ниже, чем без них. Для данного здания определяющим внешним воздействием явилось землетрясение интенсивностью 8 баллов (по шкале MSK64). Поэтому нежелательные изменения ПС при введении связи из демпферов «ВД» в условиях действия ВУВ и УС оказались несущественными.

Дополнительно был изучен вариант установки демпферов на отметке Б (рис. 8), где расположены четыре главных циркуляционных насоса, от которых за-

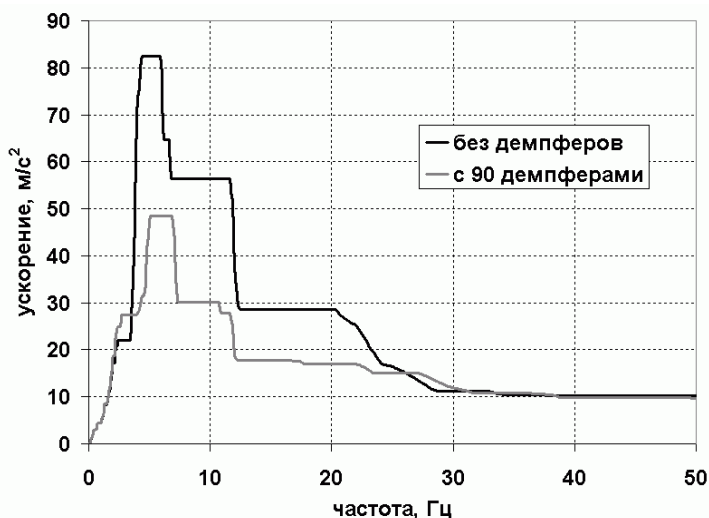


Рис. 9. ПС для верха внутренних конструкций РО при землетрясении, УС и ВУВ (для демпфирования 2%, скальное основание)

висит безотказная работа АЭС. Он оказался весьма эффективным, хотя немного уступал первому по снижению пиков ПС. Допустимо связь из демпферов частично выполнить на одной отметке, а частично – на другой, в зависимости от удобства ее расположения.

В приложении приведены результаты сравнения методов ЛСТ для двух зданий РО и типового оборудования АЭС.

Табл. 3. Максимальные ускорения при землетрясении, УС и ВУВ (скала)

Место в здании РО		Максимальные ускорения отметок здания, м/с ²		Максимальные спектральные ускорения, м/с ²	
		без демпферов	90 демпферов	без демпферов	90 демпферов
Отметка внутренних конструкций	А	10.2	6.8	82.5	48.5
	Б	8.2	5.6	67.2	39.0
	В	6.8	5.0	58.9	35.0
Зенит оболочки		9.7	9.4	81.7	79.1

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

На основе исследований, выполненных в диссертационной работе, получены следующие основные результаты.

1. Проведен качественный и количественный сравнительный анализ всех нормативных методов суммирования модальных откликов линейно-спектральной теории для расчета сооружений и оборудования АЭС (как посредством исследования функций коэффициентов корреляции, так и на основе детальных пространственных математических моделей зданий и оборудования АЭС). Демпфирование и распределение энергии сейсмического процесса по частоте (форма спектра ответа или функции спектральной плотности) явились основными факторами, определяющими сейсмический отклик системы. Из расчетов детальных моделей рассмотренных систем определена величина неконсервативной ошибки уравнения

Розенблюэта, лежащего в основе всех нормативных методов (до -24% по сравнению с результатами, полученными интегрированием). Показано, что наиболее совершенным из нормативных методов суммирования является метод Гупты.

2. Предложен усовершенствованный критерий независимости компонент сейсмической акселерограммы и обоснован для воздействия на грунте. На примере двух зданий реакторных отделений и машинного зала показано, что этот критерий может нарушаться для компонент поэтажных акселерограмм (более чем в одной трети случаев для здания реакторного отделения в местах установки особо ответственного оборудования), установлены причины этого явления. Рекомендуется при выполнении динамического расчета зданий и сооружений АЭС оценивать зоны с возможной сильной статистической зависимостью компонент поэтажных акселерограмм. В этих зонах следует отыскивать главные оси воздействия и задавать направления сейсмических компонент в этих осях или вычислять поэтажные спектры ответа совместно с коэффициентами корреляции. Показана возможность получения неконсервативных результатов при расчетах оборудования в условиях статистически зависимых компонент поэтажных акселерограмм (ошибка до -70%).

3. На примере здания реакторного отделения АЭС исследована зависимость вынужденных колебаний системы от жесткости грунта при экстремальных динамических воздействиях, учитываемых в проектах АЭС. Показано, что эта жесткость оказывает существенное влияние не только при сейсмическом воздействии, но и при взрывной ударной волне и ударе самолета. Рекомендуется при всех этих воздействиях учитывать вариацию свойств грунтового основания.

4. Разработан метод применения высоковязких демпферов типа «ВД», связывающих различные структурные элементы сооружений АЭС, для снижения колебаний сооружения и инерционных нагрузок на оборудование при экстремальных внешних воздействиях. На примере типового здания реакторного отделения АЭС установлена эффективность такого метода при условии достаточно жесткого грунтового основания (на этажах ускорения снижаются до 50%, а соответствующие максимальные спектральные ускорения – до 70%).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Петренко А.В., Бирбраер А.Н. Сравнение методов линейно-спектральной теории при использовании детальных пространственных математических моделей // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – М: ВНИИТПИ, 2004. –

№ 6, – С.27–31.

2. Петренко А.В., Бирбраер А.Н. Проверка гипотезы о статистической независимости компонент поэтажных акселерограмм при сейсмическом воздействии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – М: ВНИИТПИ, 2003. – № 5, – С.17–19.

3. New method for essential reduction of seismic loads on NPP's structures, systems and components / Kostarev V., Petrenko A., Vasilyev P. // The 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT): Transactions, vol. K, #K13-1. – Prague, IASMiRT, 2003 – pp. 1–5.

4. Effect of strong correlation between response seismic accelerations and its importance for evaluating of general equipment for reactor building components / Birbraer A., Petrenko A. // International Symposium on Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facilities: Book of invited and contributed papers # IAEA-CN-106. – Vienna, IAEA, 2003 – pp. 371 – 374.

5. A new method for essential reduction of seismic and external loads on NPP's structures, systems and components / Kostarev V., Petrenko A., Vasilyev P., Birbraer A. // International Symposium on Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facilities: Book of invited and contributed papers # IAEA-CN-106. – Vienna, IAEA, 2003 – pp. 362 – 365.

6. Петренко А.В. Исследование зависимости поэтажных спектров отклика при особых динамических воздействиях от жесткости грунтового основания // Прочность и ресурс энергооборудования: Труды ЦКТИ. – СПб, ОАО «НПО ЦКТИ», 2002. – Вып. 291 – С.205 – 214.

7. Бирбраер А.Н., Петренко А.В. Статистическая независимость компонент сейсмических акселерограмм на грунте и этажах зданий и ее значимость для сейсмостойкости оборудования АЭС // Методы повышения технического уровня и надежности элементов энергооборудования ТЭС и АЭС: Труды ЦКТИ. – СПб, ОАО «НПО ЦКТИ», 2004. – Вып. 293 – С.49 – 64.

8. Костарев В.В., Петренко А.В., Васильев П.С. Метод эффективного снижения сейсмических и особых динамических нагрузок на здания, сооружения и оборудование с использованием высоковязких демпферов // V-я Российская национальная

конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию с международным участием: Тезисы докладов. – М: ВНИИТПИ, 2003. – С.136.

9. Петренко А.В., Бирбраер А.Н. Анализ точности методов суммирования модальных откликов в линейно-спектральной теории сейсмостойкости // V-я Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию с международным участием: Тезисы докладов. – М: ВНИИТПИ, 2003. – С.97.