

**ЭВОЛЮЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ К
ИНФОРМАЦИИ ОТ СЕЙСМОЛОГОВ И
ИЗЫСКАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СВЯЗАННЫХ С БЕЗОПАСНОСТЬЮ
СООРУЖЕНИЙ
(ПО МАТЕРИАЛАМ ASCE43-05 И ASCE4-16)**

А.Г.Тяпин,

Д.т.н., Главный специалист БКП-2

Содержание

1. Действующие лица – USNRC, ASCE, BNL. Основные документы. Стандарты серии ASCE-4 (86, 98, 16) и ASCE43-05
2. Изменение концепции целеполагания в проектировании – от частоты воздействия к частоте неприемлемых событий. Проектный сейсмический базис как сочетание проектной сейсмической категории и предельного состояния. DRS, UHRS и DF. Два критерия ASCE43-05.
3. Обеспеченность сейсмических нагрузок в ASCE4-16 на уровне 80%
4. Новые требования к сейсмологам по UHRS, в т.ч. по деагрегации воздействий на уровне UHRS. Опасность перегрузки профилей
5. Новые требования к акселерограммам. Синтетические и тюнингованные записи. Количество записей. Корреляция между компонентами. Расширение круга контролируемых параметров.
6. Новые требования к заданию параметров площадки в вероятностном виде. Статистическое моделирование. Латинский гиперкуб. Проблема внутренней корреляции свойств.
7. Формат результатов SRA: три профиля и усредненный спектр

Действующие лица – USNRC, ASCE, BNL. Основные документы. Стандарты серии ASCE-4 (86, 98, 16) и ASCE43-05

USNRC – US Nuclear Regulatory Commission. RG, SRP, NUREG/CR.

ASCE – American Society of Civil Engineers

SEI – Structural Engineering Institute

BNL – Brookhaven National Laboratory

Стандарты серии ASCE-4 (86, 98, 16) Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures

ASCE/SEI 43-05 Seismic Design Criteria for Structures, Systems and Components in Nuclear Facilities

NUREG-800 – Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants.

NUREG/CR-6926. Evaluation of the Seismic Design Criteria in ASCE/SEI Standard 43-05 for Application to Nuclear Power Plants. BNL, 2007

Изменение концепции целеполагания в проектировании – от частоты воздействия к частоте неприемлемых событий. Проектный сейсмический базис как сочетание проектной сейсмической категории и предельного состояния

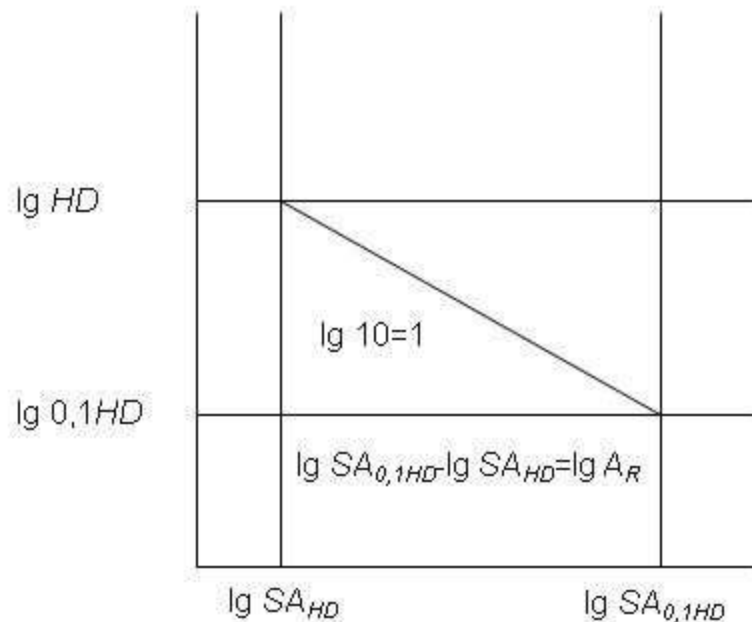
Целевой параметр поведения – среднегодовая вероятность наступления неприемлемого события P_F , определяется сейсмической проектной категорией SDC (от 1 до 5). Там же задается отношение вероятностей между превышением нагрузки несущей способности и нежелательным событием R_F (для SDC-5 это 10); отсюда вычисляется требование к вероятности превышения нагрузки несущей способности $H_D = R_F \times P_F$ (для SDC-5 это 10^{-4}). В ASCE43-05 обсуждаются категории 3...5. Категории 1,2 – для гражданских зданий (нормы IBC).

Для выбора несущей способности надо дополнительно определить, что понимается под предельным состоянием (LS): A – обрушение, B – большие остаточные деформации (не подлежит ремонту), C – умеренные остаточные деформации (подлежит ремонту), D – появление остаточных деформаций (выход за пределы упругой работы с минимальными повреждениями).

Отнесение тех или иных сооружений к категориям и выбор предельных состояний предписывается ANSI/ANS 2.26 (American national standard for design categorization of nuclear facility structures, systems, and components for natural phenomena hazards). BNL: только SDC-5D

Изменение концепции целеполагания в проектировании – от частоты воздействия к частоте неприемлемых событий. DRS, UHRS и DF

Кривая сейсмичности и ее наклон. Фиксированная спектральная частота



$$A_R = SA_{0,1HD} / SA_{HD}$$

$$K_H = 1 / \lg(A_R)$$

Изменение концепции целеполагания в проектировании – от частоты воздействия к частоте неприемлемых событий. DRS, UHRS и DF

Логнормальное распределение

несущей способности

$$F_c(a) = \Phi [\ln(a / a_c) / \beta]$$

Полная вероятность превышения

несущей способности

$$P_F = \int_0^{+\infty} \left(\frac{dF_c(a)}{da} \right) H(a) da$$

Распределение ускорений воздействия

$$H(a) = K_1 a^{-K_H}$$

Полная вероятность превышения несущей

способности всегда больше $H(a_c)$

$$P_F = H(a_c) \exp[(K_H \beta)^2 / 2]$$

Переход к несущей способности с
обеспеченностью не 50%, а P

$$a_P = a_C \exp[-X_P \beta]$$

$$P_F = K_1 (a_P)^{-K_H} \exp[(K_H \beta)^2 / 2 - X_P K_H \beta]$$

Изменение концепции целеполагания в проектировании – от частоты воздействия к частоте неприемлемых событий. DRS, UHRS и DF

Отношение несущей способности с обеспеченностью P к UHRS

$$FPDF = a_p / UHRS$$

Целевая вероятность превышения UHRS

$$H_D = H(UHRS) = K_1 (UHRS)^{-K_H}$$

В итоге

$$P_F = H_D (FPDF)^{-K_H} \exp[(K_H \beta)^2 / 2 - X_p K_H \beta]$$

Нормативный коэффициент $R_p = H_D / P_F$ (R_p - ratio of probabilities) ASCE43-05: $R_p = 10$ для SDC-5

Отсюда

$$FPDF = [R_p \exp((K_H \beta)^2 / 2 - X_p K_H \beta)]^{1/K_H}$$

Расщепление FPDF на F_p и DF

$$DF = (F_p)^{-1} [R_p \exp((K_H \beta)^2 / 2 - X_p K_H \beta)]^{1/K_H}$$

Проектное воздействие

$$DRS = DF \times UHRS$$

Аппроксимация для SDB-5D, порог A_R 1.8937

$$DF = \max[1.0, 0.6 A_R^{0.8}]$$

Изменение концепции целеполагания в проектировании – от частоты воздействия к частоте неприемлемых событий. DRS, UHRS и DF

Два критерия ASCE43-05.

- А. При обеспеченности несущей способности $P=1\%$ (это означает, что в 99% случаев несущая способность больше принятой в расчетах) коэффициент запаса по сейсмичности F_p равен 1,0 или выше (т.е. дополнительного запаса не требуется);
- В. При обеспеченности несущей способности $P=10\%$ (это означает, что в 90% случаев несущая способность выше принятой в расчетах) коэффициент запаса по сейсмичности F_p равен 1,5 или выше (т.е. дополнительный запас должен быть не меньше полутора).

Эти же два условия можно переформулировать и по-другому.

- А. При использовании в качестве спектра сейсмического воздействия 1,0 DRS условная вероятность превышения несущей способности (т.е. неприемлемого поведения) не превышает 1%.
- В. При использовании в качестве спектра воздействия 1,5 DRS (это т.н. «запроектное воздействие») условная вероятность превышения несущей способности (т.е. неприемлемого поведения) не превышает 10%.

Изменение концепции целеполагания в проектировании – от частоты воздействия к частоте неприемлемых событий. DRS, UHRS и DF

Указанные два условия должны давать два разных значения DF – эти значения обозначаются DF_a и DF_b . Для вычислений по условию А используется значение $X_{p1\%} = 2,326$; для вычислений по условию В используется $X_{p10\%} = 1,282$. Во втором случае надо не забыть про $F_p = 1,5$. Отношение получившихся коэффициентов в зависимости от значений дисперсии β представлено в Таблице 3-1.

Таблица 3-1. Отношение коэффициентов DF в зависимости от значений дисперсии β

β	DF_b / DF_a
0,3	0,91
0,4	1,01
0,5	1,12
0,6	1,25

Из двух коэффициентов DF определяющим является меньший коэффициент (предельное состояние достигается при меньших значениях ускорений воздействия). Вычисления показывают, что примерно до значения $\beta = 0,39$ определяющим является условие В; при более высоких значениях β определяющим является условие А.

Два критерия ASCE4-16.

- Нагрузка задается с вероятностью непревышения 80% при заданном уровне сейсмического воздействия
- Несущая способность в терминах прочности задается с 98% вероятностью превышения.

$$C_{STD} = \frac{S_{STD}}{D_{STD}} F_{\mu STD} DBE$$

Консервативным является занижение значений предела прочности S и коэффициента нелинейной работы F_{μ} , как и завышение сейсмической нагрузки D при заданном уровне сейсмического воздействия DBE . Поэтому две первые величины (S и F_{μ}) фиксируются в Стандартах для детерминистического расчета на уровне малой обеспеченности (вероятности непревышения 2% и 5% соответственно), а третья – на уровне большой обеспеченности (вероятность непревышения 80%).

Выводы по изменению целеполагания – новые требования к сейсмологам

- В качестве целевого показателя задается среднегодовая вероятность нежелательных событий P_F , равная для высшей категории SDB-5D $P_F=10^{-5}$ 1/год. Вводится коэффициент перехода $R_p=10$, позволяющий определить среднегодовую частоту появления проектного воздействия $H_D=10^{-4}$ 1/год. Для этой частоты вычисляется, как и раньше, спектр $UHRS(H_D)$.
- В отличие от прежнего подхода, требуется определить дополнительно спектр $UHRS(0,1H_D)$. Расчеты реакции площадки до уровня подошвы фундамента и поверхности требуется теперь провести не для одного, а для двух исходных воздействий, чтобы получить два спектра. По ним определяется частотно-зависимый коэффициент $A_R=RS(0,1H_D)/RS(H_D)$. В свою очередь, по этому коэффициенту определяется частотно-зависимый повышающий проектный коэффициент DF. Для SDB-5D он равен

$$DF = \max \left[1.0, 0.6 A_R^{0.8} \right]$$

- Полученный коэффициент DF будет умножаться на вычисленный спектр с H_D для получения проектного спектра

$$DRS = DF \times UHRS$$

Прочие новые требования к сейсмологам по определению UHRS

- Разделение двух видов неопределенности: алеаторической и эпистемической. Проще говоря, кривые сейсмичности и UHRS строятся теперь с определенной обеспеченностью. Требование 80% обеспеченности кривых сейсмичности.
- Отдельное рассмотрение сейсмических нагрузок при заданном воздействии. Снова требование 80% условной обеспеченности.
- Задание UHRS – на скале. Можно на поверхности или на фундаменте, но лучше на поверхности однородного полупространства в глубине, чтобы учитывать слоистость верхней части.
- Выделение доминирующих источников для разных спектральных частот (как минимум для 2 и 10 Гц с проверкой соотношения огибающего и результирующего спектров; критерий 90%)
- Переход от горизонтального спектра к вертикальному – на уровне DRS по специальным коэффициентам V/H , зависящим от частоты.

- Изменение отношения к фазовым спектрам Фурье. Ограничение применения синтезированных акселерограмм линейными расчетами. Технология тюнинга сеяных записей. Отбор сеяных записей по сейсмологическим критериям (не только расстояние и магнитуда, но тип разлома и пр.). Не менее пяти трехкомпонентных акселерограмм для линейных расчетов. Для нелинейных расчетов – больше.
- Проверка интегральных параметров (скоростей, смещений, продолжительности активной части) в сравнении с реальными записями.
- Изменение критериев статистической независимости компонент – 0,16 в среднем, 0,3 для каждого отдельного коэффициента. Специальные низкочастотные акселерограммы с проверкой корреляции по записям.
- Уточненные критерии соответствия вычисленных спектров целевым спектрам: сгущение гребенки частот, верхняя граница в 30% превышения, в противном случае – работа со спектральными плотностями.
- Вопрос о количестве значений демпфирования при подборе и тюнинге акселерограмм. Разногласия между ASCE и NRC.
- Деагрегация акселерограмм в случае разных доминирующих источников на разных частотах. Вместо одного набора – два и больше, соответствующие разным источникам.

Новые требования к сейсмологам по расчету реакции площадки (SRA)

- Параметры площадки выдаются с функциями их распределения. Как минимум, случайными считаются скорости сдвиговых волн при малых деформациях, а также кривые деградации. Но могут быть еще и толщины слоев, плотности и пр. Плюс должны прилагаться данные о корреляции между свойствами слоев. Это требования к изыскателям и испытателям в лабораториях. Необходимость накопления литературных данных о разбросах и корреляциях (унификация к логнормальному формату на первых порах?).
- Статистическое моделирование профилей. Технология латинского гиперкуба. Не менее 60 реализаций профилей.
- Наряду с эквивалентно-линейными – нелинейные расчеты. Но требования к валидации и верификации уравнений состояния грунта.
- Деагрегированный расчет на несколько наборов акселерограмм для широкополосных спектров и мягких глубоких грунтовых площадок.
- Усреднение спектров на поверхности и на фундаменте. Добавление проектных коэффициентов, если нужно.
- Получение трех профилей для дальнейшего расчета SSI.

ВЫВОДЫ

- В ближайшие годы нас ждет перераспределение труда между проектировщиками, сейсмологами и изыскателями. Это выразится в формате изменения содержания техзадания со стороны проектировщиков.
- Резко возрастет объем работы сейсмологов. Одно только требование к наклонам кривых сейсмичности ведет к двум значениям частот и соответственно практически удваивает объем работ.
- Растет набор проверяемых параметров (кроме спектров).
- Требования к деагрегации ведут к дальнейшему повышению объема работ.
- Новые требования к акселерограммам выводят из игры проектировщиков. Поскольку они не работают с базами записей. Область применения традиционного синтеза сокращается.
- Требования к изыскателям – новый формат с функциями распределения всех основных параметров. Главная проблема – корреляция.
- Новые требования к лабораторным испытаниям – формат результатов в вероятностном виде.
- Расчет реакции площадки с определением трех профилей тоже ляжет на сейсмологов.
- Если отечественные специалисты окажутся не готовыми к новым требованиям, проектировщики вынуждены будут искать зарубежных подрядчиков.

2013, 2015

Александр Георгиевич Тяпин – выпускник специальности «Динамика и прочность машин» Московского энергетического института (1980), доктор технических наук (1995). До 1992 г. работал в МЭИ под руководством академика В. В. Болотина; с 1992 г. – сотрудник Московского института «Атомэнергoproект». В настоящее время занимает должность главного научного сотрудника БКП-2 АЭП. Специалист по динамическому взаимодействию сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях. Автор более 150 публикаций, в том числе в научных журналах США, Европы и Японии, участник международных конференций.



РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

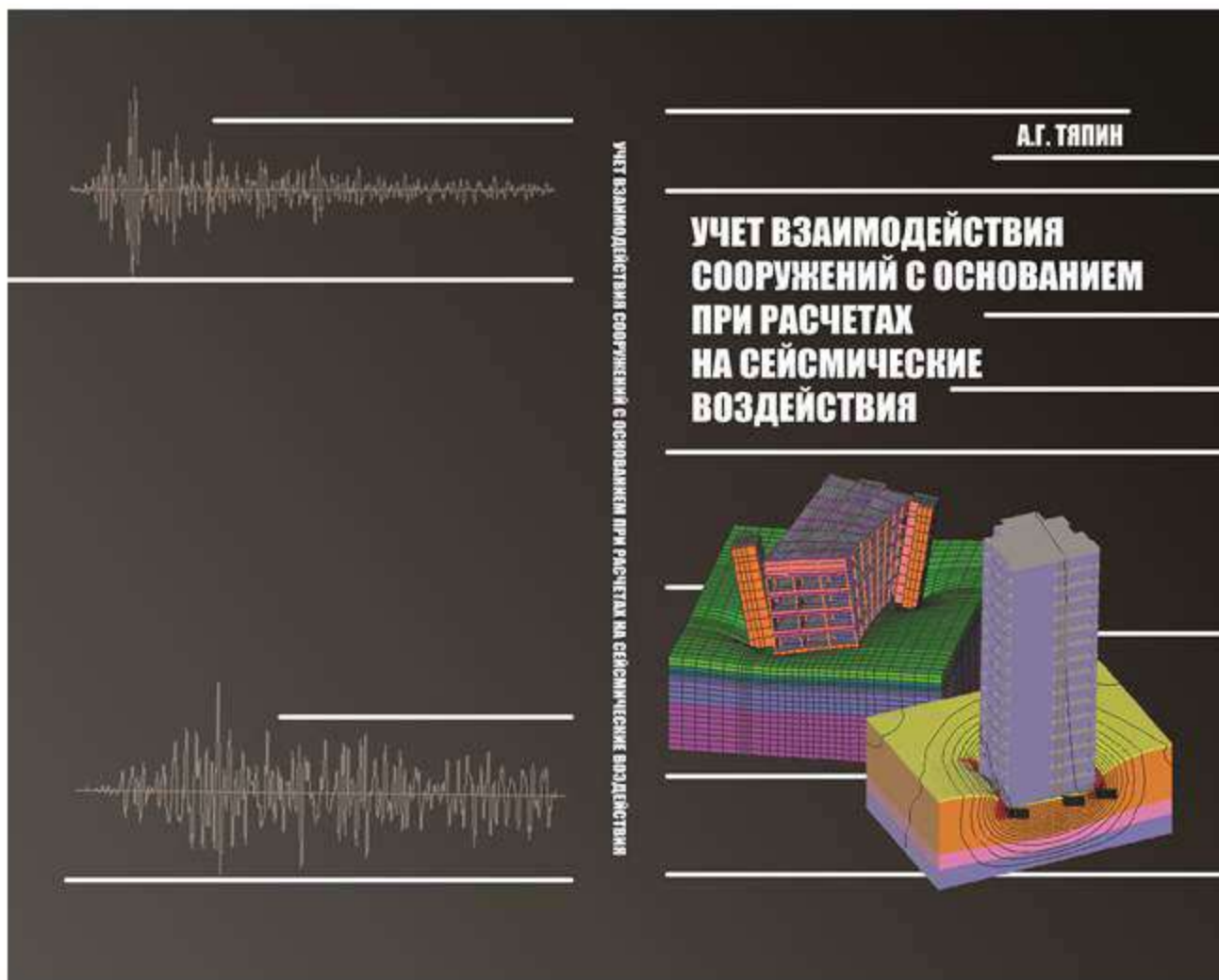
А. Г. Тяпин

РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ



$$F(t) = \int D(\omega) U(\omega) \exp(i\omega t) d\omega$$







Об авторе. А.Г. Тяпин — выпускник специальности «Динамика и прочность машин» Московского энергетического института (1980), доктор технических наук (1995). До 1992 г. работал в МЭИ под руководством академика В.В. Болотина; с 1992 г. — сотрудник московского института «Атомэнергoproект». В настоящее время занимает должность главного специалиста БКП-2 АЭП. Специалист по динамическому взаимодействию сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях. Проводил расчеты проектируемых российских АЭС в Иране, Болгарии, Турции, Индии, Бангладеш. Автор двух монографий и более 200 публикаций, в т.ч. в научных журналах США, Европы и Японии, участник международных конференций.

ПЛАТФОРМЕННЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ УЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СООРУЖЕНИЙ С ОСНОВАНИЕМ ПРИ РАСЧЕТАХ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

А.Г. Тяпин

ПЛАТФОРМЕННЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ УЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СООРУЖЕНИЙ С ОСНОВАНИЕМ ПРИ РАСЧЕТАХ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ



2015

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!