ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ КОДОВ ABAQUS ПРИ РАСЧЕТАХ ПОЭТАЖНЫХ СПЕКТРОВ ОТВЕТА В ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

А.И. Попов[1], А.В. Птицына[1], С.Н. Тропкин [2]

[1]ФГУП «ГИ «ВНИПИЭТ», г. Санкт-Петербург, Россия
[2]ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

В этом докладе авторы не предлагают каких-либо новых расчетных методик, все расчеты проводились с учетом требований существующей нормативной базы.

Расчеты производились с использованием вычислительного комплекса ABAQUS, аттестованного для расчетов объектов использования атомной энергии (аттестационный паспорт ПС № 278 от 13.05.2010г. НТЦ ЯРБ).

Расчетное обоснование прочности строительных конструкций зданий и сооружений обычно выполняется по следующей схеме:

- анализ результатов обследований строительных конструкций;
- создание полномасштабной математической модели исследуемого здания с учетом реального состояния строительных конструкций;
- расчет внутренних усилий в строительных конструкциях с учетом сейсмических нагрузок, полученных по данным микросейсморайонирования, подтверждение сейсмостойкости;
- расчет поэтажных спектров ответа для дальнейшего расчета оборудования.

В качестве расчетного было принято сейсмическое воздействие, полученное в результате микросейсморайонирования.

При расчете строительных конструкций учитывались все три компоненты сейсмического воздействия.

В процессе определения усилий в строительных конструкциях рассматривались основное и два особых сочетания нагрузок, указанные в табл. 1.

Табл. 1 - Сочетания нагрузок и воздействий при расчете строительных конструкций

Наименование нагрузок и воздействий	Коэффициенты сочетания		
Основные нагрузки	1.0	0.9	0.9
Сейсмические нагрузки	-	1.0	-1.0

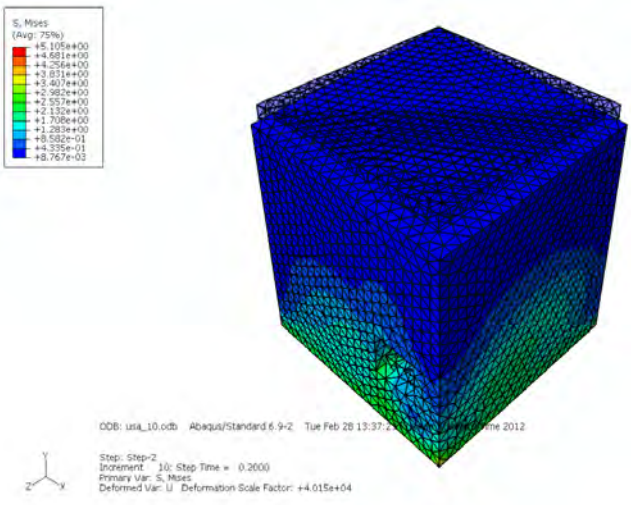
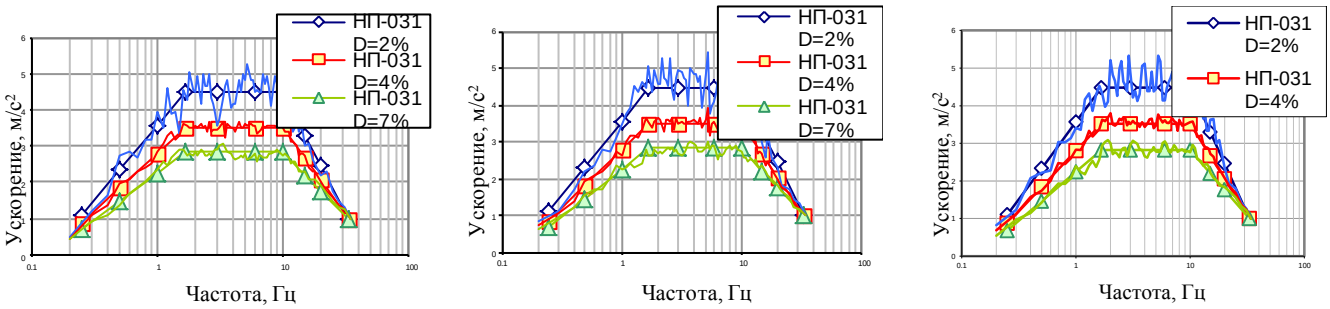


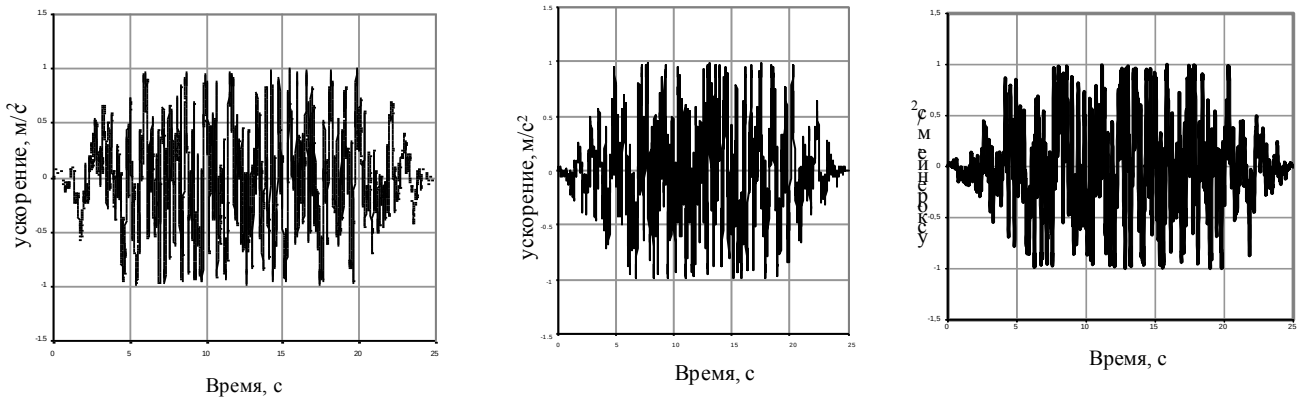
Рис. 1 - Первая собственная форма колебаний (тело на грунте с частотой 4 Гц

На рис. 2 представлены спектры реакции на грунте, соответствующие нормам НП-031-01 «Проектирование сейсмостойких атомных станций».



горизонт 1 горизонт 2 вертикаль

Рис. 2 - Нормативные спектры ускорений на грунте



горизонт 1 горизонт 2 вертикаль

Рис. 3 - Синтезированная трехкомпонентная акселерограмма

На рис. 3 показаны соответствующие им синтезированные акселерограммы.

Сопоставительный анализ поведения монолитных и сборных конструкций позволил сделать некоторые обобщения:

-низшие формы колебаний монолитных конструкций представляют собой колебания здания на грунте (свойства грунта моделируются введением в схему эквивалентных жесткостей);

-формы колебаний сборных конструкций, жестко защемленных в основание - это упругие колебания самой конструкции и ее элементов, при расчете требуется учитывать существенно большее число собственных форм по сравнению с монолитными конструкциями;

-при расчете сборно-монолитных конструкций целесообразно сначала рассчитывать нижнюю монолитную часть, нагрузив ее весовыми параметрами верхней сборной части, проверять прочность, получать поэтажные спектры ответа на отметках крепления верхнего строения;

создавать модель и производить расчет верхнего строения, использую поэтажные спектры в качестве исходного воздействия.

- в некоторых элементах конструкции могут появляться локальные зоны увеличения и, соответственно, усилий и напряжений.

Подобные результаты могут быть объяснены с точки зрения точного математического решения (резонанс какого - либо элемента), однако требуют инженерного анализа и внесения корректировок в расчетную схему.

Ускорения строительных конструкций при землетрясении, а следовательно, внутренние усилия в них и нагрузки на оборудование очень сильно зависят от величины потерь энергии в системе "сооружение-основание", с ростом которых они уменьшаются.

Поскольку в СНиП и Нормах АЭ отсутствуют однозначные рекомендации по определению жесткости и демпфирования грунтового основания, был проведен анализ литературных данных, как отечественной, так и зарубежной литературы.

Величина потерь энергии в разных частях системы "сооружение-основание" неодинакова. В самом сооружении они связаны с внутренним трением в материале и с конструкционным демпфированием (т. е. трением в сочленениях и стыках).

Величину потерь в строительных конструкциях учитывают введением коэффициентов диссипации энергии по каждой из собственных форм, совокупно учитывая все виды потерь установленные на основе экспериментов и натурных наблюдений В качестве примера в табл. 2 приведены значения затуханий при проектировании АЭС в США. Уровень ПЗ соответствует усилиям (напряжениям), составляющим примерно 67%, а МРЗ - около 90% от предельной прочности конструкций.

Табл. 2 - Значения затухания при проектировании АЭС

Тип сооружения или оборудования	Относитель-ное затуха-ние ζ,, %	
	ПЗ[1]	МРЗ[2]
Системы трубопроводов большого диаметра[3] ($D_y \geq 100$ мм) и оборудование	2	3
Системы трубопроводов малого диаметра[4] ($D_y < 100$ мм)	1	2
Стальные конструкции:		
сварные	2	4
на болтах	4	7
Бетонные конструкции:		
предварительно напряженные	2	5
армированные	4	7

Близкие к указанным значения затуханий рекомендуются и нормами Европейского сообщества [5].

В действительности в экспериментах при таких напряжениях наблюдалось более высокое рассеяние энергии, т.е. приведенные затухания являются осторожной нижней оценкой.

Затухания в табл. 2 отражают потери энергии в самом сооружении и соответствуют случаю абсолютно жесткого основания. Однако значительно более высокие потери могут иметь место в основании. Они обусловлены двумя факторами. Первый - внутреннее (гистерезисное) трение в грунте, которое зависит от величины сдвиговых деформаций, и при малых деформациях, обычных при сейсмических колебаниях зданий, невелико ($\varsigma \le 0.02$).

Другая причина потерь энергии в основании - излучение в него отраженных от сооружения упругих волн. Отметим, что они представляют собой затухания при движении эквивалентных линейных осцилляторов, пропорциональные их скоростям. Для здания в качестве таких движений можно принять поступательные перемещения фундамента по горизонтали и вертикали и повороты относительно горизонтальной и вертикальной осей. Тогда относительные затухания составят [7]:

$$\zeta_{0x} = \frac{0.288}{\sqrt{B_x}};\ \zeta_{0z} = \frac{0.425}{\sqrt{B_z}};\ \zeta_{0\varphi} = \frac{0.15}{(1+B_\varphi)\sqrt{B_\varphi}};\ \zeta_{0\psi} = \frac{0.5}{1+2B_\psi},$$

где Bx, Bz, Bφ и Bψ - коэффициенты, зависящие от вида грунта и инерционных характеристик здания, равные соответственно:

$$B_x = \frac{(7-8\nu)m}{32(1-\nu)\rho r_э^3};\ B_z = \frac{(1-\nu)m}{4\rho r^3};\ B_\varphi = \frac{3(1-\nu)I_y}{8\rho r^5};\ B_\psi = \frac{I_z}{\rho r^5};$$

где m - масса сооружения, равная 2,7*108 кг;

гэ-эквивалентный радиус, равный

$r_э = \sqrt{ab/\pi}$ - для ζox и ζoz

$r_э = \sqrt[4]{a^3 b/(3\pi)}$ - дляζoφ

$r_э = \sqrt[4]{16ab(a^2+b^2)/(6\pi)}$ - для для ζoψ.

a, b - размеры прямоугольной плиты части здания в осях 5-20, соответственно равные 90 и 72 м;

Iy, Iz- моменты инерции сооружения, соответственно равные и 2,2*1011 кгм2 и 2,9*1011 кгм2;

ρ - плотность, равная 2005 кг/м3;

ν=(δ2-2)/2(δ2-1) - коэффициент Пуассона, равный 0,475;

δ=υp/υs

υp,υs - скорости продольных и поперечных волн в грунте соответственно равные 1400 м/с и 305 м/с.

В результате вычислений было получено:

ζox=0,548;

ζoz=0,976;

ζoφ=0,352;

ζoψ=0,48.

При учете затухания за счет излучения в основание принимают во внимание два обстоятельства:

Во-первых, эти формулы применимы для слоя однородного грунта, толщина которого до подстилающей скалы не меньше максимального горизонтального размера плиты. В нашем случае максимальный горизонтальный размер плиты достигает 90 метров. По результатам инженерно-геологических изысканий площадки до глубины 90 м и более залегают кембрийские глины, таким образом допустимо применять выше указанные формулы для расчета относительных затуханий при расчете поэтажных спектров ответа . В данном случае (размер фундамента до 90 м и он соизмерим с полуволной колебаний при землетрясении), пренебрегать разновременностью подхода сейсмической волны нельзя. Однако методика подобных расчетов нормами также не регламентирована. Очевидно, что учет этого фактора также позволит снизить сейсмическую нагрузку на фундаментную плиту и, соответственно, на верхнее строение. Во-вторых, величина потерь энергии за счет излучения может быть очень значительной. Поэтому, учитывая, что реальное основание много сложнее математической модели, принятой при выводе данных формул, и что его неоднородность, трещиноватость и т.п. могут препятствовать распространению отраженных волн, в некоторых странах предельную величину диссипации в основание искусственно ограничивают. Например, в Германии принимают ζoz = 0,35, ζox = 0,15 и ζoφ=0.15. Для сравнения надо отметить, что затухания в грунт в Российской практике обычно консервативно принимают 0,1. Учитывая вышеизложенное, были рассчитаны поэтажные спектры ответа на отметке верха монолитного здания при 10% затухании в грунт и 20% затухании в грунт (график 1). При анализе пиковых значений и диапазона частот этих спектров можно сделать вывод, что научно - обоснованное сейсмологами увеличение затухания в грунт дает снижения спектров на отметке верха здания на 40%, что весьма существенно.

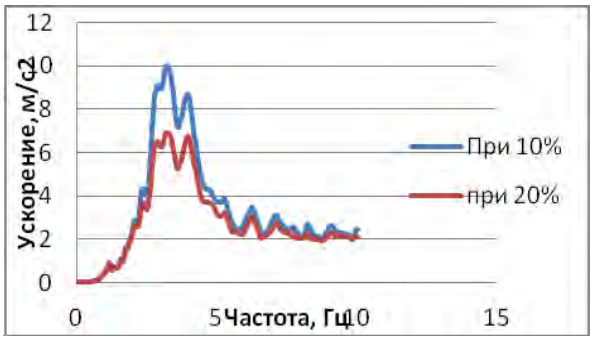


График 1 – Огибающий ПС на отметке +12.450 (горизонтальная компонента Рис. 7 - Поэтажные спектры ответа при 10% и 20% затухании в грунт от критического.

Комплекс проведенных работ позволил сделать следующие основные выводы и рекомендации для существующих зданий и сооружений:

-использование спектра НП-0310-01 в качестве исходного сейсмического воздействия приводит к получению заведомо завышенных результатов. Наиболее правильный путь – это использование спектров на грунте, полученных в результате сейсмического микрорайонирования;

- необходима корректировка нормативных документов в части учета демпфирующих свойств грунтового основания;

-при расчете сборно-монолитных конструкций целесообразно сначала рассчитывать нижнюю монолитную часть, нагрузив ее весовыми параметрами верхней сборной части, проверять прочность, получать поэтажные спектры ответа на отметках крепления верхнего строения после чего на эти спектры рассчитывать верхнее строение;

- для получения реальных результатов расчеты необходимо производить на реальные для площадки строительства особые воздействия.

Список литературы

1. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01. Госатомнадзор России, М., 2001.
2. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97) ПН АЭ Г-1-011-97. -М.: Энергоатомиздат, 1997, 68 с.
4. СНиП 2.01.07-85 / Нагрузки и воздействия Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987.
6. СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. Госстрой СССР / М.: Стройиздат, 1982.
8. Комплексный технический отчет о сейсмическом микрорайонировании площадки Ленинградской АЭС / ПНИИИС, М., 1991.