

УДК 624.01

С. М. ТравинПетербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ КОЛЕБАНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ХРАНИЛИЩА ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА
ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

«Мокрые» хранилища для долгосрочного хранения отработавшего ядерного топлива – это сооружения, представляющие высокую потенциальную опасность, следовательно, их сейсмостойкость является важным и актуальным вопросом. Такие хранилища состоят из жесткой нижней части и гибкого каркасного верха, который наиболее уязвим для землетрясения. В данной работе приведены результаты исследования влияния жесткости грунтового основания на интенсивность колебаний каркасной части «мокрого» хранилища отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000 при сейсмическом воздействии. Исследование выполнено с использованием численных методов анализа и метода конечных элементов, программных комплексов ABAQUS и SCAD. Рассматривались колебания каркасной части в поперечном и в вертикальном направлениях (в продольном направлении рамы раскреплены жестким диском ограждающих конструкций). Было установлено, что жесткость основания существенно влияет на интенсивность колебаний каркаса лишь в вертикальном направлении. В поперечном направлении влияние оказалось не столь существенным.

отработавшее ядерное топливо, хранилище отработавшего ядерного топлива, землетрясение, сейсмостойкость, грунтовое основание, жесткость грунтового основания, интенсивность колебаний строительных конструкций.

Введение

Необходимость развития атомной энергетики очевидна. Ученые спрогнозировали, что мировые запасы органических видов топлива могут иссякнуть уже в обозримом будущем. Комплекс процессов, связанных с получением ядерной энергии называется ядерным топливным циклом (ЯТЦ) [1]. Завершающей стадией ЯТЦ является долгосрочное хранение отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), признанного одним из наиболее опасных материалов на Земле [2].

Для долгосрочного хранения ОЯТ используют специальные инженерные сооружения – хранилища отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ), среди которых выделяют «мокрые» и «сухие». Конструктивной особенностью почти

всех «мокрых» ХОЯТ для долгосрочного хранения является наличие жесткой, практически недеформируемой нижней части и гибкого каркасного верха. Эти объекты чрезвычайно опасны: серьезная авария на них способна привести к глобальной техногенной катастрофе. Одной из причин такой аварии может стать обрушение строительных конструкций каркасной части хранилища в результате землетрясения.

Общеизвестно, что на характер колебаний строительных конструкций при землетрясении существенно влияют грунтовые условия. Цель настоящей работы – изучение влияния жесткости грунтового основания на интенсивность колебаний каркасной части «мокрых» ХОЯТ

при сейсмическом воздействии. В качестве объекта исследования выбран отсек хранения «мокрого» ХОЯТ реакторов ВВЭР-1000.

1 Строительные конструкции объекта исследования

Строительные конструкции отсека хранения «мокрого» ХОЯТ ВВЭР-1000 можно условно разделить на 2 части: жесткий монолитный бассейн, в котором непосредственно хранится топливо, и гибкий каркас, ограждающий бассейн от окружающей среды (рис. 1). Размеры сооружения в плане – 48×30 м; высота 16,2 м.

Монолитный железобетонный бассейн разделен на четыре участка и транспортный коридор. Стены и днище бассейна облицованы нержавеющей сталью. Толщина элементов строительных конструкций:

- днище и поперечные стены 1000 мм;
- наружная стена транспортного коридора 1500 мм;
- внутренняя стена транспортного коридора 2000 мм;
- наружная стена отсека хранения 1100 мм.

Выше бассейнов хранения сооружение однопролетное каркасное. Основными несущими конструкциями являются рамы, состо-

ящие из железобетонных колонн сечением 400×400 мм высотой 6 м, на которые шарнирно опираются стальные фермы покрытия. Колонны жестко заделаны в строительные конструкции монолитной части.

Ограждающие конструкции – керамзитобетонные панели толщиной 400 мм, покрытие – сборные ребристые железобетонные плиты пролетом 12 м и 6 м, кровля плоская рулонная.

2 Исходные данные

Для оценки интенсивности колебаний каркасной части сооружения построены поэтажные спектры ответа (ПСО) в точках крепления колонн каркаса. При помощи многоцелевого конечноэлементного комплекса ABAQUS CAE создана математическая модель бассейна хранения (рис. 2). Каркасная часть сооружения в данной модели учитывалась с помощью задания инерционных масс. Принята декартова система координат, при этом ось X направлена вдоль сооружения, ось Z – поперек, ось Y – по высоте.

Грунтовое основание моделировали пружинами, динамические характеристики которых вычисляли по выражениям, приведенным в [3, 4]. Рассмотрены пять типов осно-

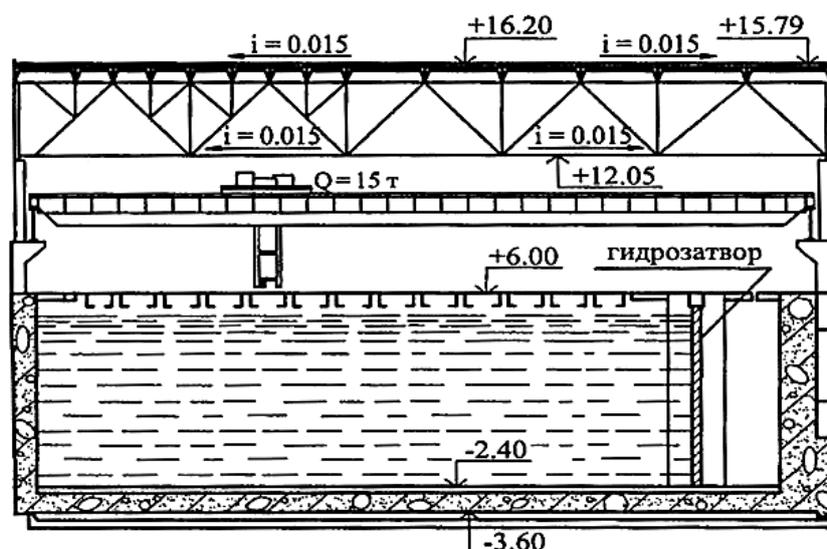


Рис. 1. Поперечный разрез объекта исследования

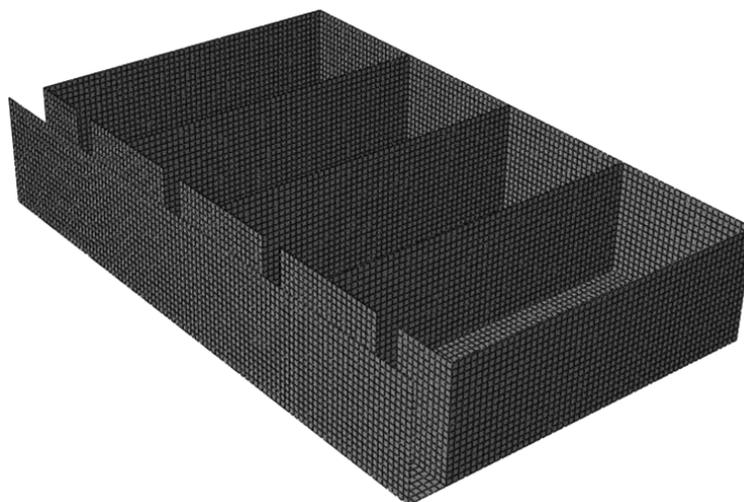


Рис. 2. Расчетная модель бассейна хранения

вания: от слабого (грунт 1) с модулем сдвига $6,5 \cdot 10^7$ Н/м², что может соответствовать влажным пластичным глинистым грунтам [5], до несжимаемого скального. Характеристики рассмотренных типов основания приведены в табл. 1. Отметим, что наиболее близким к реальным грунтовым условиям объекта исследования является именно грунт 1.

В качестве исходного сейсмического воздействия использована трехкомпонентная синтезированная запись [6], горизонтальные компоненты которой масштабированы к максимальному ускорению 2 м/с², а вертикальная – к $1,33$ м/с², т.е. моделировалось сейсмическое воздействие интенсивностью 8 баллов по шкале MSK-64. Спектры ускорений, соответствующие принятому воздействию приведены на рис. 3.

Расчеты выполняли методом модальной суперпозиции с заданием демпфирования по формам.

Для определения динамических характеристик гибкой части сооружения при помощи проектно-вычислительного комплекса SCAD OFFICE создана расчетная модель поперечной рамы каркаса. Использовались стержневые конечные элементы.

3 Результаты исследования

На первом этапе вычисляли собственные частоты и формы колебаний железобетонной части сооружения при различных грунтовых условиях. Установлено, что основной вклад по модальным массам вносили формы колебания сооружения на грунте (рис. 4; табл. 2).

Далее построены ПСО в точках крепления колонн каркасной части сооружения. Результаты исследования показали, что ПСО действительно сильно зависят от жесткости грунтового основания. На рис. 5 в качестве примера при-

ТАБЛИЦА 1. Характеристики грунтового основания

Тип грунта	Модуль сдвига, Н/м ²	Плотность, т/м ³	Коэффициент Пуассона
Грунт 1	$6,5 \cdot 10^7$	2	0,4
Грунт 2	$2,16 \cdot 10^8$	2	0,4
Грунт 3	$7,2 \cdot 10^8$	2	0,4
Грунт 4	$2,4 \cdot 10^9$	2	0,4
Грунт 5 (скала)	∞	–	–

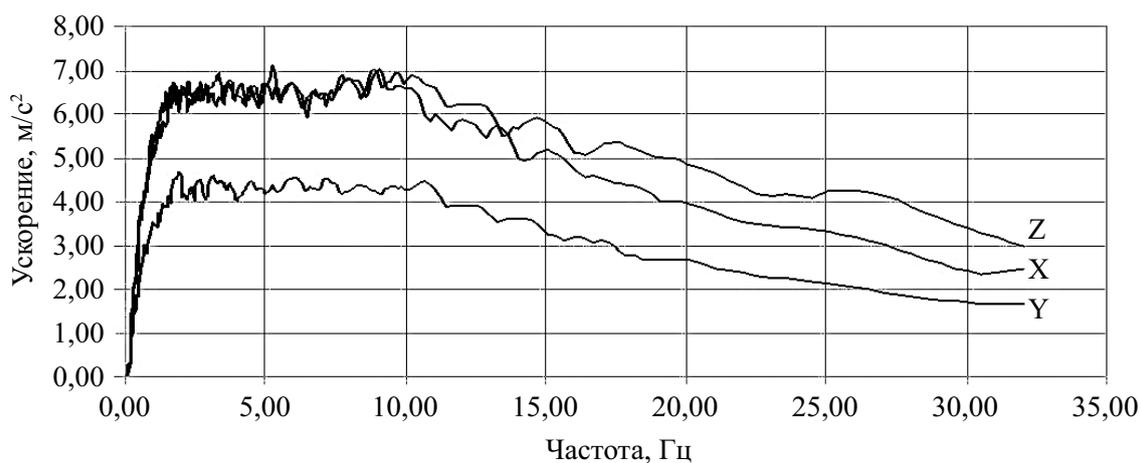


Рис. 3. Исходные спектры ответа принятого воздействия (демпфирование 5 %)

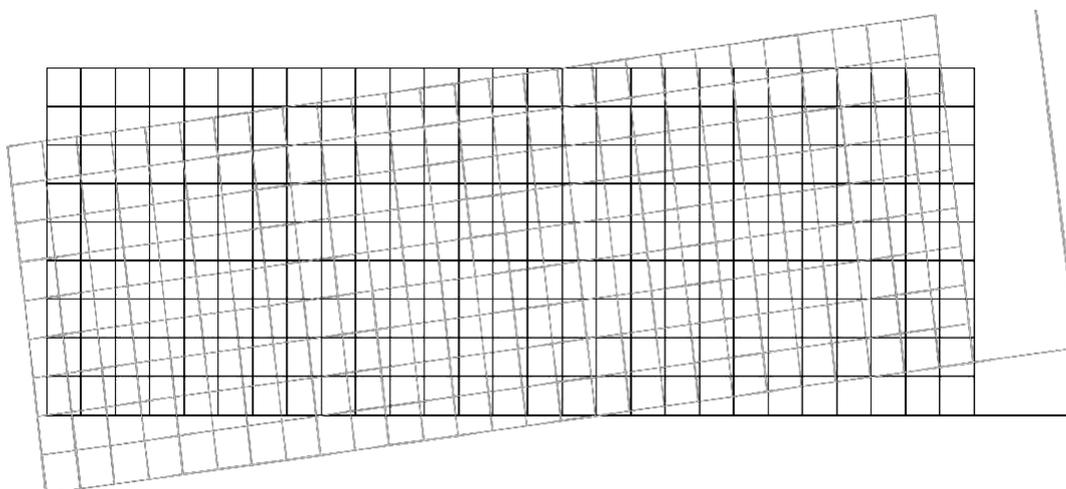


Рис. 4. Форма колебания сооружения на грунте в поперечном направлении

ТАБЛИЦА 2. Зависимость частот определяющих форм собственных колебаний бассейна на грунте от жесткости основания

№ грунта	Модуль сдвига, Н/м ²	Частота, вносящая наибольший вклад по модальным массам в поперечном направлении, Гц	Частота, вносящая наибольший вклад по модальным массам в вертикальном направлении, Гц
1	$6,5 \cdot 10^7$	1 форма (2,46)	6 форма (3,03)
2	$2,16 \cdot 10^8$	1 форма (4,48)	6 форма (5,52)
3	$7,2 \cdot 10^8$	1 форма (8,17)	6 форма (10,07)
4	$2,4 \cdot 10^9$	1 форма (15,02)	6 форма (18,39)
5 (скала)	∞	—	—

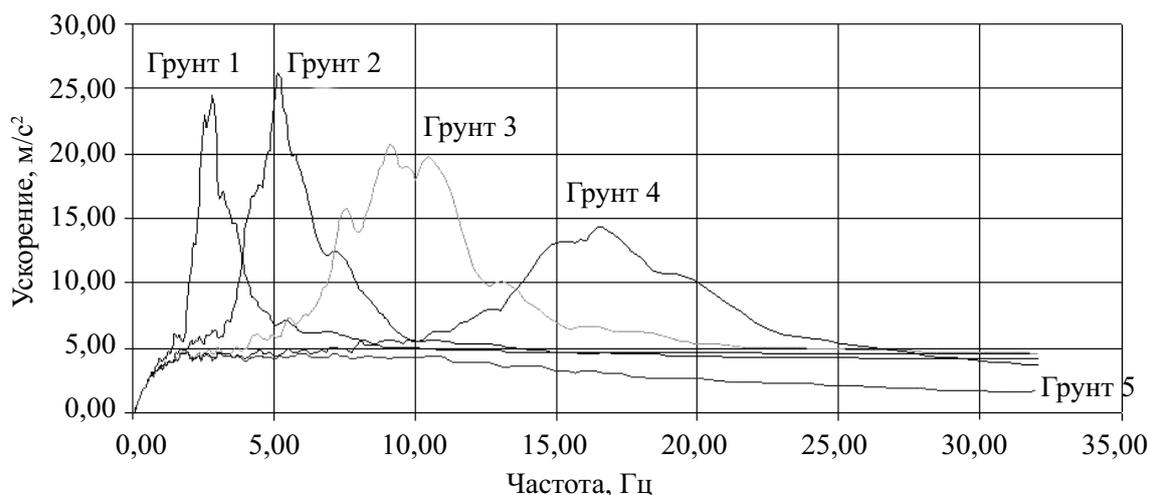


Рис. 5. Вертикальные ПСО в точках крепления колонн (демпфирование 5%)

ведено семейство спектров, наглядно демонстрирующее эту зависимость. Отметим, что похожие результаты получил А. В. Петренко, изучавший интенсивность вынужденных колебаний конструкций реакторного отделения АЭС [7].

Следующим шагом вычисляли динамические характеристики гибкой части сооружения. Основной вклад по модальным массам в поперечном направлении вносила форма частотой 0,57 Гц, в вертикальном направлении – частотой 2,5 Гц. Продольное направление не рассматривали, так как рамы каркаса раскре-

плены жестким диском стеновых ограждающих конструкций.

На рис. 6 приведены ответные ускорения каркаса в вертикальном и поперечном направлениях. По значениям этих ускорений можно судить о величине сейсмической нагрузки на строительные конструкции каркаса (интенсивности колебаний каркаса).

Результаты показали, что из-за очень низкой определяющей частоты (0,57 Гц) жесткость грунтового основания практически не влияла на сейсмические нагрузки, действующие на каркас в поперечном направлении.

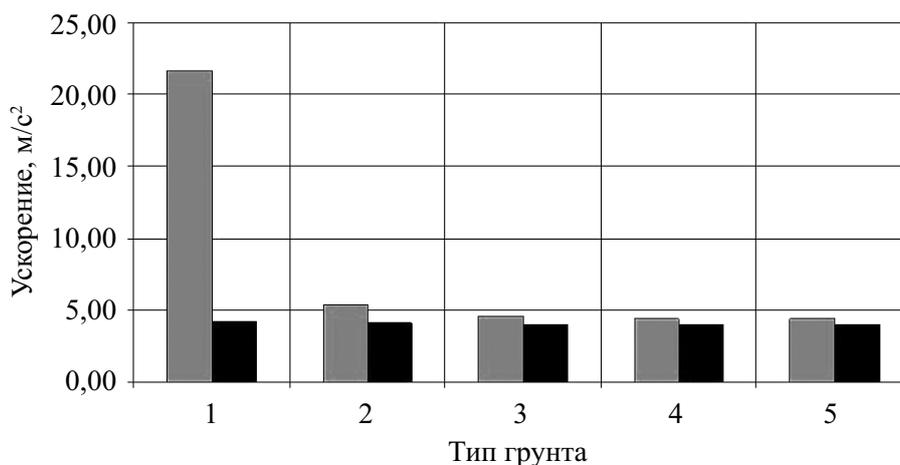


Рис. 6. Ответные ускорения каркасной части сооружения в вертикальном (светлые столбики) и в поперечном (темные столбики) направлении

Однако в вертикальном направлении влияние оказалось существенным. Максимальное ускорение ($21,7 \text{ м/с}^2$) наблюдалось при наиболее мягком грунте (грунт 1). При увеличении жесткости основания ускорения резко уменьшались (в 4 раза). Дальнейшее повышение жесткости грунта привело к незначительному последовательному снижению интенсивности вертикальных колебаний каркаса.

Заключение

Таким образом, жесткость основания существенно влияет на интенсивность колебаний каркаса объекта исследования лишь в вертикальном направлении, причем наиболее интенсивные колебания происходят, если основанием служит мягкий грунт (грунт 1), с увеличением жесткости грунта ответные ускорения существенно уменьшаются. Можно сделать следующие выводы:

- при мягком грунте (грунт 1) наиболее уязвимой для землетрясения частью каркаса объекта исследования станут фермы покрытия, которые могут испытать перегрузку более $2g$;
- так как наиболее близким к реальным грунтовым условиям объекта исследования является именно грунт 1, для повышения сейсмостойкости сооружения рекомендуется усилить грунтовое основание (например, цементацией и т. п.);
- при проектировании сейсмостойких сооружений, имеющих схожие конструктивные особенности, следует выбирать площадку строительства, сложенную жесткими грунта-

ми, при отсутствии такой возможности искусственно увеличивать жесткость основания.

Несмотря на то что исследование выполнено на примере конкретного сооружения, полученные результаты носят качественный характер и могут быть актуальны как для других «мокрых» ХОЯТ, так и для сооружений, имеющих схожие конструктивные особенности.

Библиографический список

1. **Радиохимическая** переработка ядерного топлива АЭС / В. И. Землянухин, Е. И. Ильенко, А. Н. Кондратьев и др. – М. : Энергоатомиздат, 1983.
2. **United States Government Accountability Office**, Commercial Spent Nuclear Fuel, Observations and Key Attributes and Challenges of Storage and Disposal Options, Apr. 11, 2013. – P. 1.
3. **Нормы** проектирования атомных станций на сейсмостойкость : методич. рекомендации МР 1.5.2.05.999.0027-2011. – М. : Концерн Росэнергоатом, 2011.
4. **Расчет** конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. – СПб. : Наука, 1998.
5. **Методические** рекомендации по определению динамических свойств грунтов, скальных пород и местных строительных материалов. П 01-72. – СПб. : ВНИИГ им. Веденеева, 1972.
6. **Нормы** проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01. – М., 2001.
7. **Динамика** сооружений и оборудования АЭС при экстремальных внешних воздействиях : автореф. дис. ... канд. тех. наук / А. В. Петренко. – СПб., 2005.