

УДК 624.01

**С. М. Травин**Петербургский 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-

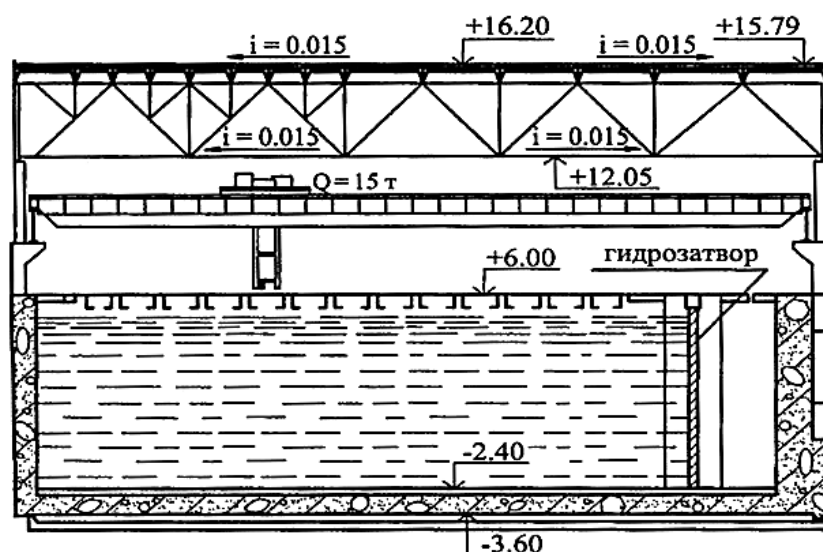


Рис. 1. Поперечный разрез объекта исследования

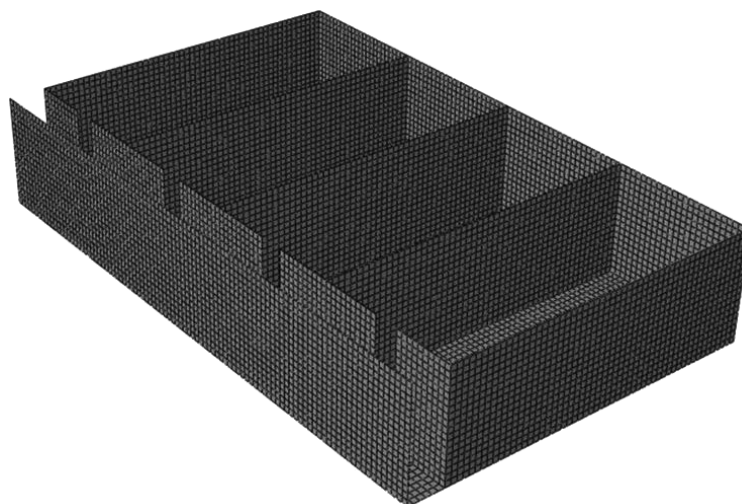


Рис. 2. Расчетная модель бассейна хранения

вания: от слабого (грунт 1) с модулем сдвига  $6,5 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, 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/с<sup>2</sup>, а вертикальная – к  $1,33$  м/с<sup>2</sup>, 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 <sup>2</sup>	Плотность, т/м <sup>3</sup>	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)	$\infty$	–	–

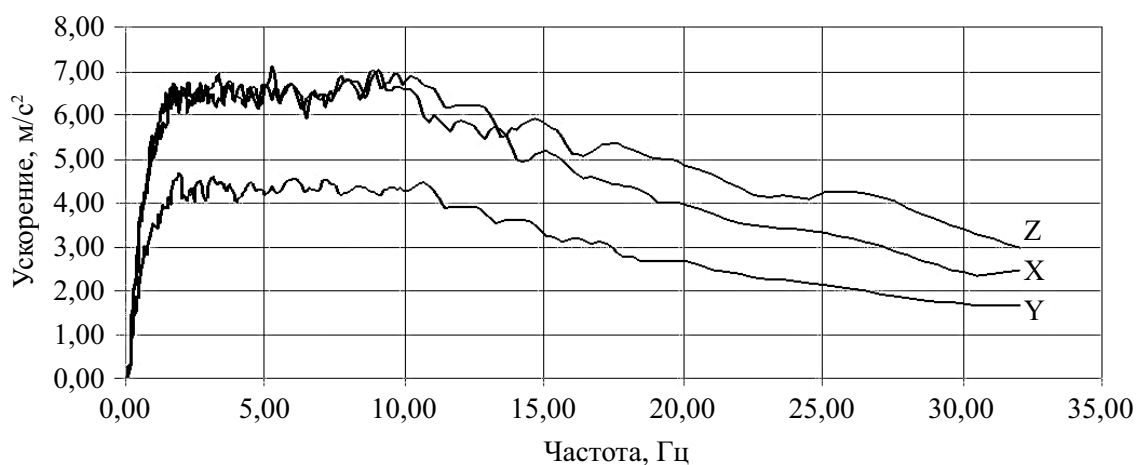


Рис. 3. Исходные спектры ответа принятого воздействия (демпфирование 5 %)

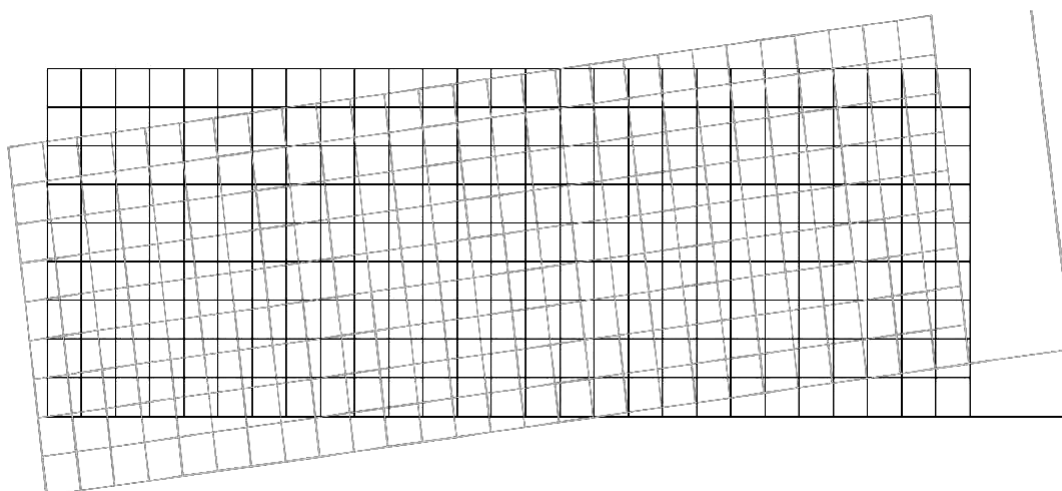


Рис. 4. Форма колебания сооружения на грунте в поперечном направлении

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

№ грунта	Модуль сдвига, Н/м <sup>2</sup>	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)	$\infty$	—	—

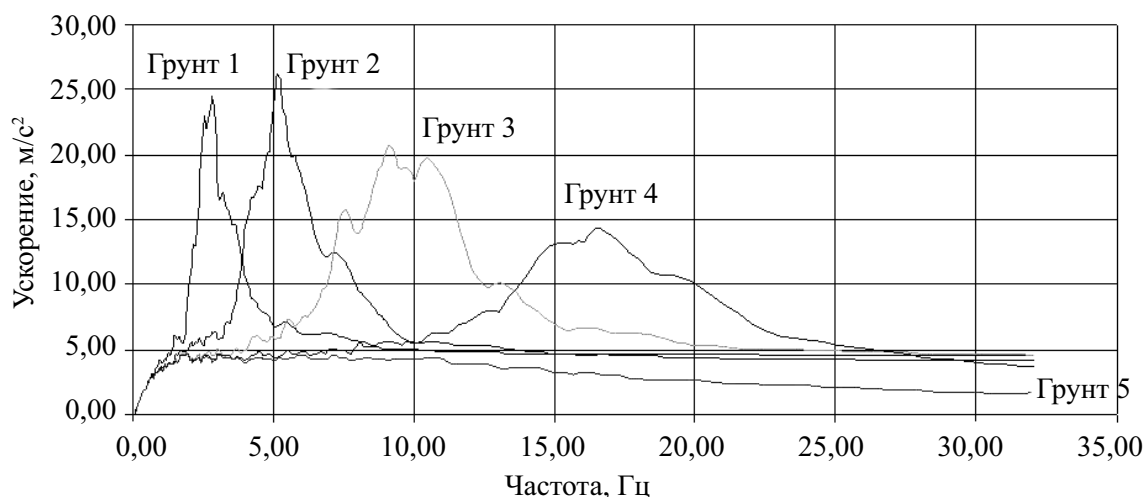


Рис. 5. Вертикальные ПСО в точках крепления колонн (демпфирование 5%)

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.

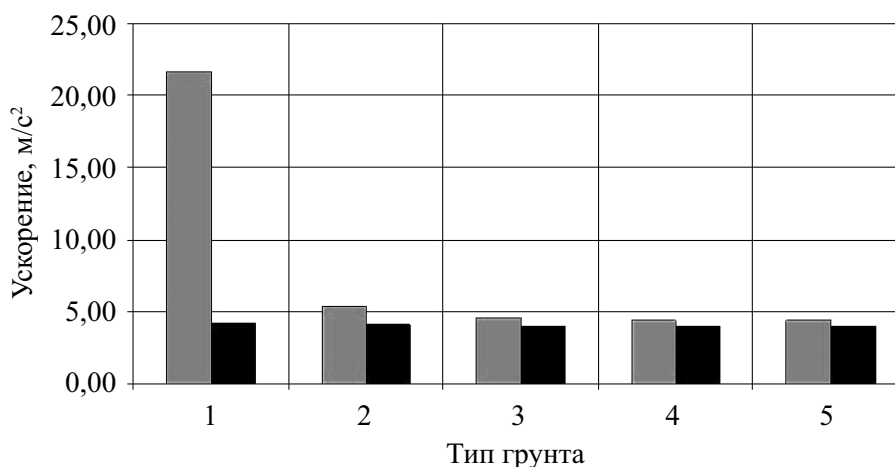


Рис. 6. Ответные ускорения каркасной части сооружения в вертикальном (светлые столбики) и в поперечном (темные столбики) направлении

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.