УДК 699.841
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-79-88

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СООРУЖЕНИЙ АЭС СОВМЕСТНО С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

С.В. КОВАЛЬ, д-р техн. наук
А.В. КУЗЬМИНОВ
П.А. РОДИН✉
Н.М. СИДОРОВ

ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» Ростехнадзора, г. Москва, ул. Малая Красносельская, д.2/8, к. 5, Москва, 107140, Российская Федерация

При проведении расчетов сооружений совместно с грунтовым основанием с использованием специализированных программных комплексов на действие сейсмического нагружения прямыми динамическими методами используются различные подходы моделирования сейсмовоздействия и совместной работы сооружения и грунтового основания. В данной работе проведены расчеты кинематических параметров сооружения совместно с грунтовым основанием для различных моделей сооружения и грунтового основания с использованием специализированных ПК SCAD и STAR_T. Проведены расчеты эталонного сооружения типа этажерка на сейсмические воздействия интенсивностью 7 баллов. В результате проведенных расчетов получены расчетные поэтажные акселерограммы и построены поэтажные спектры ответа. Проведен анализ и сравнение результатов расчета по различным методикам и моделям сооружения.

Ключевые слова: АЭС, спектр ответа, прямой динамический метод, сейсмическое воздействие, грунтовое основание, акселерограмма

Для цитирования: Коваль С.В., Кузьминов А.В., Родин П.А., Сидоров Н.М. Динамический анализ сооружений АЭС совместно с грунтовым основанием на сейсмическое воздействие // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. Т. 31. № 4. С. 79–88. doi: https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-79-88

Вклад авторов
Коваль С.В. – разработка метода, анализ результатов, участие в написании статьи. Кузьминов А.В., Родин П.А., Сидоров Н.М. – участие в написании статьи, анализ результатов.

Финансирование
Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DYNAMIC SEISMIC ANALYSIS OF NUCLEAR POWER PLANT BUILDINGS AND BEARING STRATUM

S.V. KOVAL, Dr. Sci. (Engineering)
A.V. KUZMINOV
P.A. RODIN✉
N.M. SIDOROV

Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Malaya Krasnoselskaya str., 2/8, bld. 5, Moscow, 107140, Russian Federation

Various approaches are used for simulating seismic loading and collaboration of a structure and a bearing stratum when carrying out dynamic seismic analysis in specialized software. In the present work, the kinematic parameters of various structures and bearing stratum were calculated using SCAD and STAR_T software. Seismic performance of a reference tower type supporting frame was calculated for 7 grade earthquake. As a result, the floor accelerograms were calculated, and the floor response spectra were built. The calculation results obtained by various methods and structure models were analyzed and compared.

Keywords: nuclear power plant, response spectrum, direct dynamic method, seismic loading, bearing stratum, accelerogram

For citation: Koval S.V., Kuzminov A.V., Rodin P.A., Sidorov N.M. Dynamic seismic analysis of nuclear power plant buildings and bearing stratum. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021. Vol. 31. No. 4. P. 79–88 (In Russ.). doi: https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-79-88

Author contribution statements
S.V. Koval – method development, results analysis, draft preparation; A.V. Kuzminov, P.A. Rodin, N.M. Sidorov – draft preparation, results analysis.

Funding
No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

При проведении расчетов сооружений совместно с грунтовым основанием с использованием специализированных программных комплексов на действие сейсмического нагружения прямыми динамическими методами используются различные подходы моделирования сейсмовоздействия и совместной работы сооружения и грунтового основания.

В качестве расчетных моделей могут использоваться различные конечные элементы, моделирующие строительные конструкции.

Немаловажную роль играет и выбор метода расчета динамических процессов на продолжительном отрезке времени, свойственном сейсмическим процессам, продолжительностью десятки секунд.

Основания, фундаменты, перекрытия, покрытия, стены, ригели, балки и другие конструкции сооружений могут моделироваться различными конечными элементами и их комбинациями, включающими стержневые, оболочечные, пластинчатые, объемные конечные элементы.

В данной работе проведены расчеты и проанализированы результаты расчета кинематических параметров сооружения совместно с грунтовым основанием для различных моделей сооружения и грунтового основания.

Оценка параметров сейсмических колебаний модельного сооружения совместно с грунтовым основанием проведена с использованием специализированных ПК SCAD и STAR_T /3/.

В качестве задачи выбрана железобетонная «этажерка» на плитном фундаменте совместно с грунтовым массивом. Рассматривается сооружение, представляющее собой трехэтажную конструкцию, состоящую из абсолютно жесткой фундаментной плиты толщиной 500 мм, на которую опираются шесть колонн сечением 500 × 800 мм, и трех перекрытий толщиной 300 мм на отметках 3, 6 и 9 м, шаг колонн 3 × 5 м. Центр координат находится в геометрическом центре фундаментной плиты.

Исходные данные для расчета:

- h = 0,3 м – толщина плит перекрытия;
- H = 0,5 м – толщина фундаментной плиты;
- сечение колонн 500 × 800 мм;
- ρ_1 = 2,5 т/м^3 – плотность материала конструктивных элементов;
- E = 3,1 × 10^{10} Па – модуль упругости конструктивных элементов;
- μ_1 = 0,17 – коэффициент Пуассона конструктивных элементов;
- ξ = 0,07 – коэффициент затухания конструктивных элементов;
- ρ_2 = 2,0 т/м^3 – плотность материала грунта;
- μ_2 = 0,25 – коэффициент Пуассона грунта;
- v = 350 м/с – скорость поперечной волны в грунте.

Для анализа кинематических параметров выбраны:

- в ПК SCAD (точка покрытия);
- в ПК STAR_T (свободная поверхность грунта, фундаментная плита, точка покрытия).

Расчет в SCAD

Рассматривается этажерка из пластинчатых и стержневых элементов (рис. 1*а*), модель основания – пружина конечной жесткости, к которой приложены акселерограммы. Вязкие свойства грунта учитываются демпфированием по Релею.

Воздействие на сооружение задается трехкомпонентной синтезированной акселерограммой уровня проектного землетрясения (ПЗ) интенсивностью 7 баллов по шкале MSK-64.

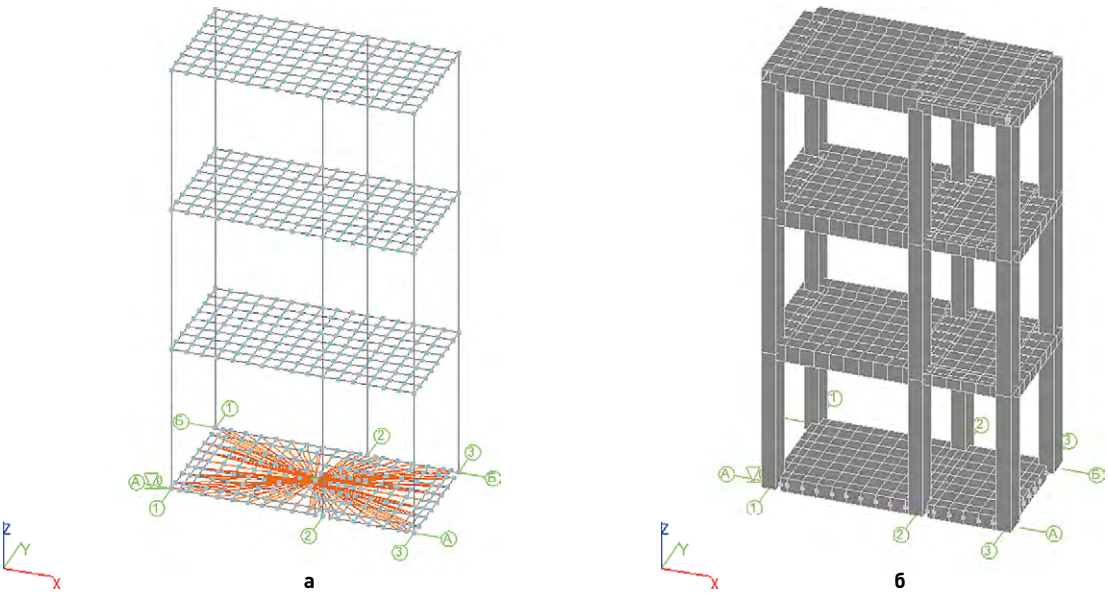
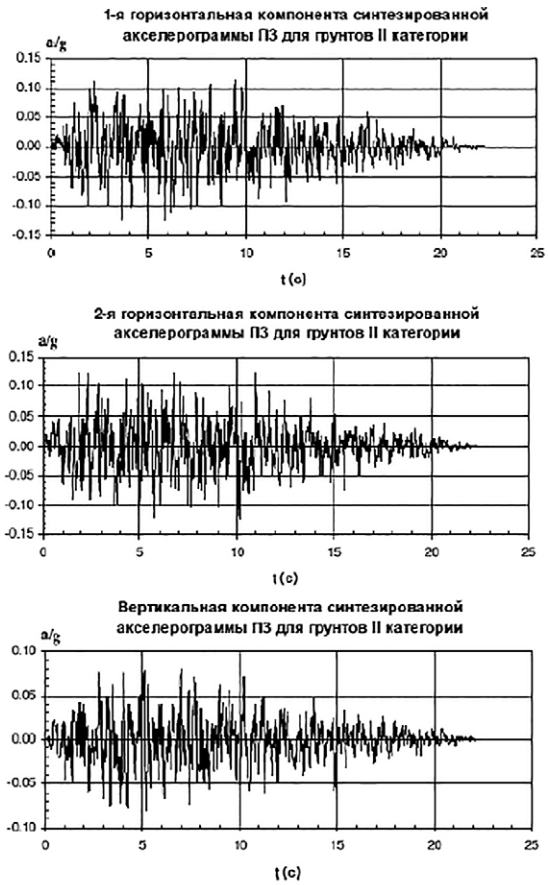
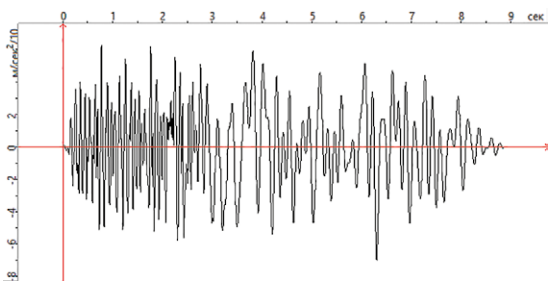


Рис. 1. *а* – конечно-элементная модель из стержневых и пластинчатых элементов; *б* – общий вид расчетной области

Fig. 1. *а* – finite element model of bar and plate elements; *б* – general view of computational domain



а



б

Рис. 2. *а* – трехкомпонентная акселерограмма; *б* – расчетная акселерограмма на покрытии – SCAD (A_{max} = 0,5 м/с^2)

Fig. 2. *а* – three-component accelerogram; *б* – calculated accelerogram on surface – SCAD (A_{max} = 0.5 m/s^2)

Максимальные ускорения в горизонтальных направлениях составляют 0,12 g, в вертикальном – 0,08 g. Длительность воздействия равняется 22,5 с (в рассматриваемом примере длительность воздействия ограничена 10 с), шаг оцифровки – 0,01 с (рис. 2*а*).

Расчет в STAR_T

Рассматривается волновая контактная задача об распространении волны в полупространстве. Расчетная область состоит из сооружения и полупространства и моделируется объемными изопараметрическими 8-точечными конечными элементами типа трапецоид (рис. 3).

Исходные данные

Вязкопластические свойства грунта учитываются моделью упруго-вязкопластического грунта типа Рыкова – Григоряна.

Основные размеры и физико-механические характеристики расчетной области приведены выше, грунтовый массив под всей областью толщиной 5 м.

Граничные условия – ограничение перемещений только нижней грани расчетной области, боковые грани свободны и не закреплены (усиление условий консервативности).

В качестве начальных условий заданы исходные волновые сейсмические воздействия в грунтовом массиве 1, 2 (выделены на расчетной схеме объемы грунта, рис. 4) в виде трехкомпонентных ускорений.

На свободной поверхности фундаментной плиты, грунтового основания и наземного строения задаются точки, в которых необходимо получить графики акселерограмм для сравнения их значений на грунте и фундаментной плите, а также для построения поэтажных спектров ответа на конструкциях верхнего строения (стены, колонны, ригели, перекрытия, покрытия).

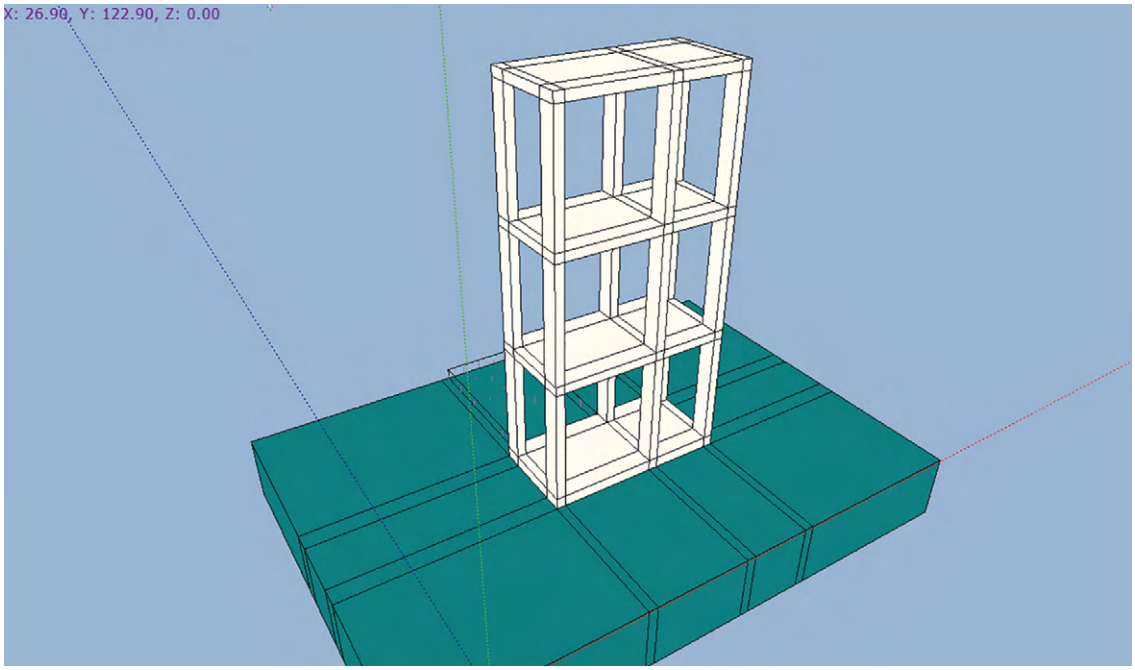


Рис. 3. Общий вид расчетной области модельной задачи (белый цвет – железобетон, зеленый цвет – грунтовое основание)
Fig. 3. General view of computational domain for model problem (white – reinforced concrete, green – soil base)

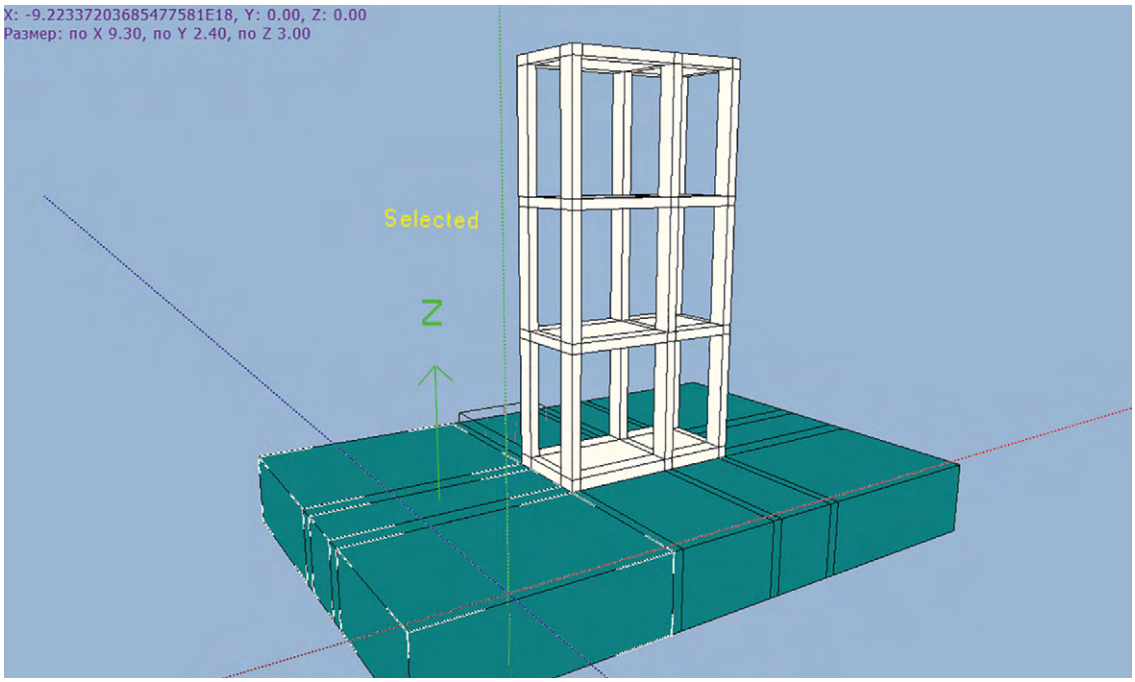


Рис. 4. Выделенные объемы с заданными начальными ускорениями A1, A2, A3 = 1 м/с^2
Fig. 4. Selected volumes with given initial accelerations A1, A2, A3 = 1 m/s^2

По результатам расчета в STAR_T получены трехкомпонентные акселерограммы

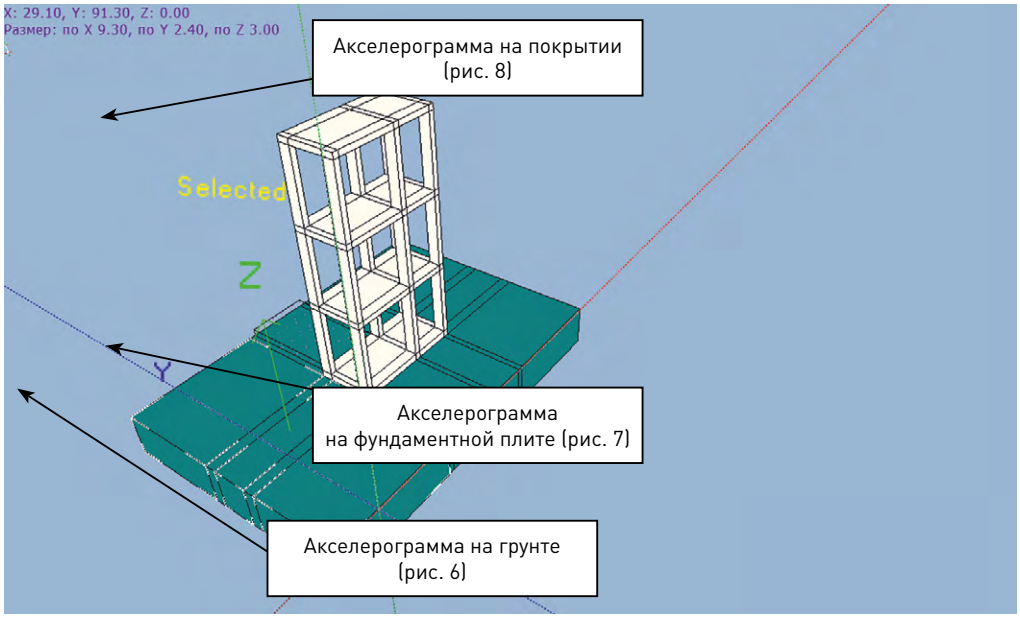


Рис. 5. Точки вывода акселерограмм
Fig. 5. Accelerogram output points

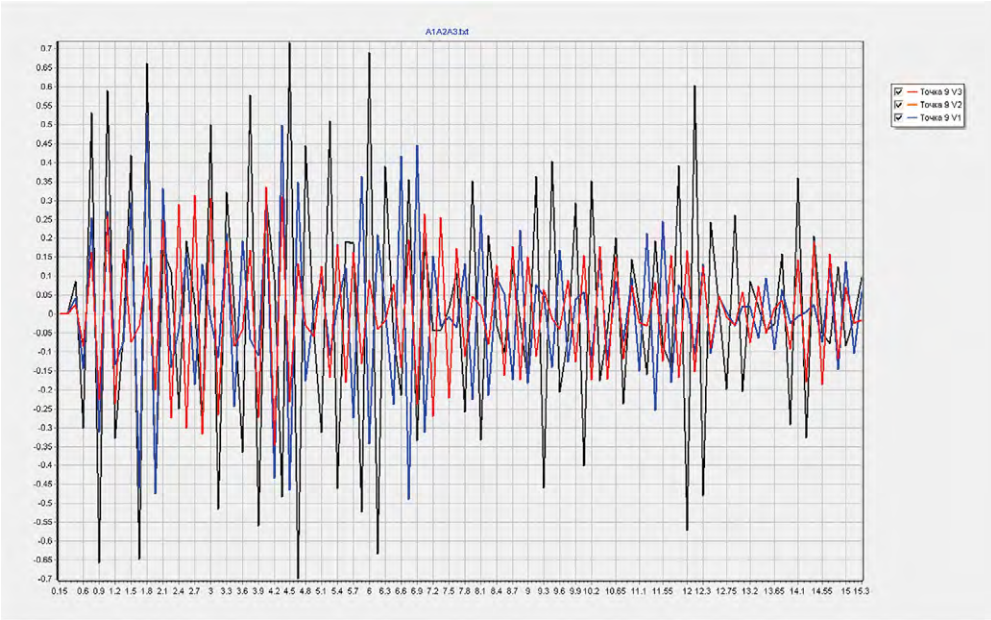


Рис. 6. Расчетные трехкомпонентные акселерограммы на поверхности грунта (3 графика на одном скане A_{max} = 0,7 м/с^2)
Fig. 6. Calculated three-component accelerograms on ground surface (3 graphs in one scan A_{max} = 0.7 m/s^2)

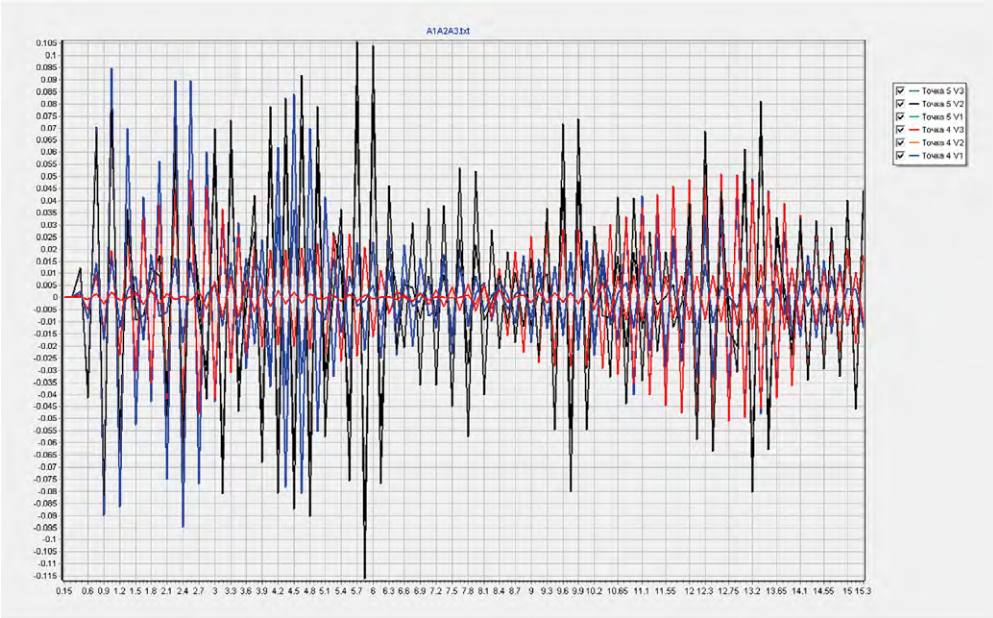


Рис. 7. Расчетные трехкомпонентные акселерограммы на фундаментной плите, A_{max} = 0,1 м/с^2
Fig. 7. Calculated three-component accelerograms on raft foundation, A_{max} = 0.1 m/s^2

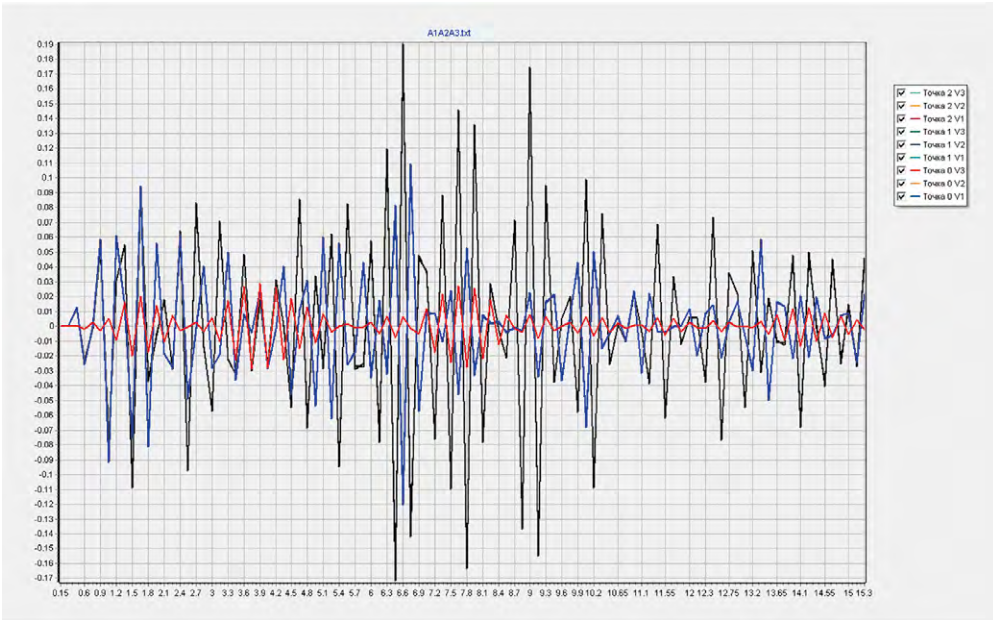


Рис. 8. Расчетные трехкомпонентные акселерограммы на покрытии STAR_T, A_{max} = 0,19 м/с^2
Fig. 8. Calculated three-component accelerograms on surface STAR_T, A_{max} = 0.19 m/s^2

Сравнение спектров ответа по расчетным акселерограммам в ПК SCAD и STAR_T

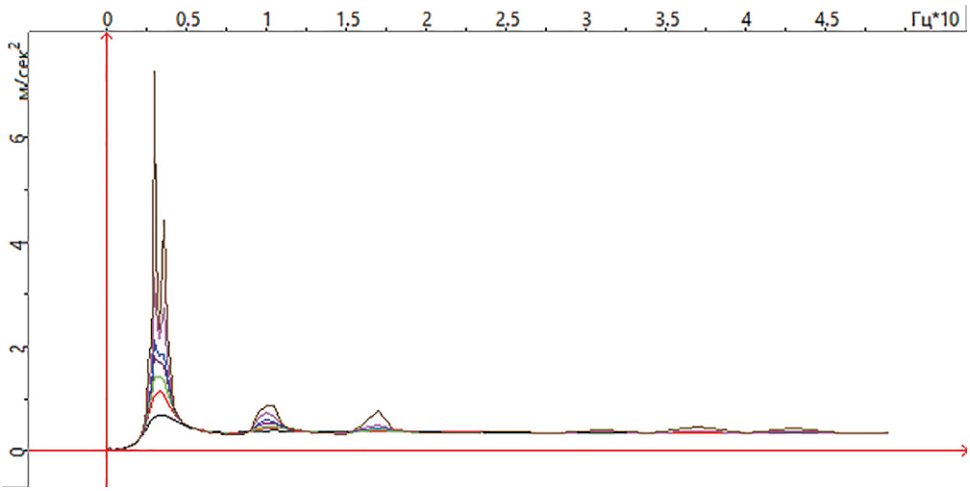


Рис. 9. Спектры ускорений на плите покрытия для всего диапазона логарифмических декрементов (ПК_STAR_T).
Максимальное ускорение – 0,3470324 м/с² достигается в момент времени 4,05 с
Максимальная скорость – 0,005 м/с² достигается в момент времени 3,45 с
Максимальное перемещение – 0,003 м достигается в момент времени 10,2 с
Fig. 9. Acceleration spectra on roof slab in entire range of logarithmic decrements (PC_STAR_T).
The maximum acceleration of 0.3470324 m/s² is achieved at 4.05 s
The maximum speed of 0.005 m/s² is achieved at 3.45 s
The maximum displacement of 0.003 m is achieved at 10.2 s

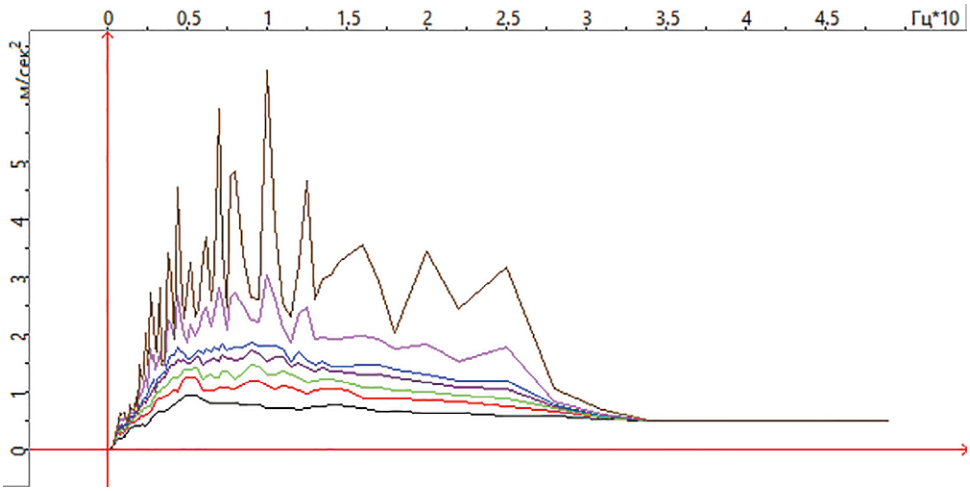


Рис. 10. Спектры ускорений на плите покрытия для всего диапазона логарифмических декрементов (ПК_SCAD).
Максимальное ускорение – 0,50401 м/с² достигается в момент времени 4,03 с
Максимальная скорость – 0,034 м/с² достигается в момент времени 4,83 с
Максимальное перемещение – 0,007 м достигается в момент времени 5,11 с
Fig. 10. Acceleration spectra on roof slab in entire range of logarithmic decrements (PC_SCAD).
The maximum acceleration of 0.50401 m/s² is achieved at 4.03 s
The maximum speed of 0.034 m/s² is achieved at 3.45 s
The maximum displacement of 0.007 m is achieved at 5.11 s

Результаты расчета кинематических параметров

По схеме точечного приложения акселерограмм в ПК_SCAD ускорения на покрытии достигают максимума 0,5 м/с^2, а в ПК STAR_T – 0,2 м/с^2.

Выводы

В данной работе проведен прямой динамический расчет для двух различных моделей объекта с использованием ПК SCAD и STAR_T на заданное сейсмовоздействие интенсивностью 7 баллов.

При расчете по упрощенной схеме в ПК SCAD отсутствует возможность получения акселерограмм на грунте и фундаментной плите, т. к. они задаются как исходное воздействие, также при расчетах по упрощенной схеме необходимо проведение многовариантных расчетов с различными коэффициентами демпфирования, т. к. небольшой разброс коэффициентов по Рэлею дает отличающиеся на порядок значения акселерограмм.

Расчет по схеме «сооружение – основание» показал, что при приходе сейсмовоздействия как волнового процесса и моделирования контактной задачи параметры колебаний свободной поверхности и фундаментной плиты отличаются почти на порядок (0,7 м/с^2 на грунте и 0,08 м/с^2 на фундаментной плите), причем на покрытии они отличаются всего в 2 раза.

При расчете по модели сооружения совместно с грунтовым основанием эти проблемы отсутствуют в связи с возможностью задания любой математической модели деформирования материалов конструкций и грунтового основания как по деформационной теории, так и по теории пластического течения.

Проведенный анализ показал, что для проведения расчетов на сейсмические воздействия наиболее эффективными из методов прямого интегрирования являются неявные методы (в частности примененный в расчетах метод Ньюмарка), обладающие безусловной устойчивостью и не требующие жестких ограничений на шаг по времени и сеточное разбиение расчетной области.

Список литературы

1. *Снитко Н.К.* Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок / Н.К. Снитко. – Ленинград: Госстройиздат, 1963. – 295 с.

2. *Глушков Г.И.* Расчет сооружений, заглубленных в грунт / Г.И. Глушков. – Москва: Стройиздат, 1977. – 295 с.

3. *Коваль С.В.* Программный комплекс START_T для проведения расчетов наземных заглубленных и подземных сооружений / С.В. Коваль, Ф.Б. Киселев. – Москва: МГУ, 2014. – Рег. № 2015610074 от 10.11.2014.

Информация об авторах / Information about the authors

Коваль Сергей Всеволодович, д-р техн. наук, заместитель начальника отдела надежности строительных конструкций ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» Ростехнадзора, Москва
e-mail: koval@secnrs.ru

Sergey V. Koval, Dr. Sci. (Engineering), Deputy Head, Department of Reliability of Civil Engineering Constructions, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow
e-mail: koval@secnrs.ru

Кузьминов Александр Владимирович, старший научный сотрудник отдела надежности строительных конструкций ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» Ростехнадзора, Москва
e-mail: kuzminov@secnrs.ru
Alexander V. Kuzminov, Senior Researcher, Department of Reliability of Civil Engineering Constructions, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow
e-mail: kuzminov@secnrs.ru

Родин Павел Александрович*, младший научный сотрудник отдела надежности строительных конструкций ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» Ростехнадзора, Москва
e-mail: prodin@secnrs.ru
тел.: +7 (499) 264-40-45
Pavel A. Rodin,* Junior Researcher, Department of Reliability of Civil Engineering Constructions, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow
e-mail: prodin@secnrs.ru
tel.: +7 (499) 264-40-45

Сидоров Никита Маркович, младший научный сотрудник отдела надежности строительных конструкций ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» Ростехнадзора, Москва
sidorov@secnrs.ru
Nikita M. Sidorov, Junior Researcher, Department of Reliability of Civil Engineering Constructions, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow
e-mail: sidorov@secnrs.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author