

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ СООРУЖЕНИЙ SEISMIC RESISTANCE

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-1-30-41
УДК 699.841

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов в зависимости от частотного состава сейсмического воздействия

А.Е. Бабский¹, В.В. Лалин², И.И. Олейников¹, В.А. Тарасов^{1,2*}

¹Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «АТОМПРОЕКТ»,
Российская Федерация, 197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82, лит. А

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д. 29

*vtarasov1000@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 31 декабря 2020 г.
Доработана: 8 февраля 2021 г.
Принята к публикации: 12 февраля 2021 г.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Academic Excellence Project 5–100, реализуемого Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Для цитирования

Бабский А.Е., Лалин В.В., Олейников И.И., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов в зависимости от частотного состава сейсмического воздействия // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 1. С. 30–41. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-1-30-41>

Аннотация. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов сложнейшая и многогранная проблема, включающая в себя множество аспектов. Фундамент турбоагрегата – специальная строительная конструкция, объединяющая части турбоагрегата в единую машину и служащая для восприятия статических и динамических нагрузок. Количество проектируемых и строящихся электростанций в районах с высоким уровнем сейсмичности велико и продолжает расти. Среди прочих перед инженером-проектировщиком и расчетчиком возникает вопрос влияния частотного состава сейсмического воздействия на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов. Динамические расчеты проводятся в программном комплексе Nastran методом прямого интегрирования уравнений движения с применением метода конечных элементов. Основными критериями сейсмостойкости виброизолированного фундамента турбоагрегата приняты величины максимальных сейсмических ускорений в осевом направлении на отметке установки турбоагрегата, а также величины максимальных сейсмических перемещений виброизолированного фундамента (деформации виброизоляторов). Результаты проведенных вычислительных экспериментов свидетельствуют о значительном влиянии частотного состава сейсмического воздействия на поведение виброизолированных фундаментов турбоагрегатов. Расчеты фундаментов, учитывающие землетрясения одинаковой интенсивности, но с различными значениями преобладающих частот воздействия, приводят к различающимся в несколько раз значениям максимальных сейсмических ускорений на отметке установки турбоагрегата и сейсмических перемещений.

Ключевые слова: виброизолированный фундамент турбоагрегата, спектр ответа, сейсмостойкость, землетрясение, частотный состав сейсмического воздействия, динамика сооружений, сейсмический расчет

Бабский Александр Евгеньевич, главный специалист по динамике сооружений строительного отдела – турбинный остров; eLIBRARY SPIN-код: 9620-8675, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8297-1630>.

Лалин Владимир Владимирович, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института, доктор технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 8220-6921, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3850-424X>.

Олейников Илья Игоревич, инженер-проектировщик строительного отдела – турбинный остров; eLIBRARY SPIN-код: 5199-3194, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6473-5669>.

Тарасов Владимир Александрович, аспирант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института; eLIBRARY SPIN-код: 9264-3744, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>.

© Бабский А.Е., Лалин В.В., Олейников И.И., Тарасов В.А., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Seismic stability of vibration-insulated turbine foundations depending on the frequency composition of seismic impact

Aleksandr E. Babsky¹, Vladimir V. Lalin², Iliia I. Oleinikov¹, Vladimir A. Tarasov^{1,2*}

¹JSC ATOMPROEKT, 82A Savushkina St, Saint Petersburg, 197183, Russian Federation

²Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

*vtarasov1000@yandex.ru

Article history

Received: December 31, 2020

Revised: February 8, 2021

Accepted: February 12, 2021

Acknowledgements

This research work was supported by the Academic Excellence Project 5–100 proposed by Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation.

For citation

Babsky A.E., Lalin V.V., Oleinikov I.I., Tarasov V.A. Seismic stability of vibration-insulated turbine foundations depending on the frequency composition of seismic impact. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(1): 30–41. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-1-30-41>

Abstract. The seismic resistance of vibration-insulated turbine foundations is a complex and multifaceted problem that includes many aspects. The turbine foundation is a special building structure that unites parts of the turbine and generator unit into a single machine and it is used for static and dynamic loads accommodation. The number of designed and constructed power plants in high seismic level areas is large and steadily growing. In addition, engineers and designers deal with the issue of the frequency composition of the seismic impact influence on the seismic resistance of vibration-insulated turbine foundations. Dynamic calculations were performed in NASTRAN software using time history analysis and the finite element method. The main criteria for the seismic resistance of a vibration-insulated turbine foundation are the values of the maximum seismic accelerations in the axial direction at the level of the turbine installation and the values of vibration-insulated foundation maximum seismic displacements (deformations of vibration isolators). The results of the calculation experiments proved a significant effect of seismic action frequency composition on the behavior of the vibration-insulated turbine foundations. Calculations of foundations, taking into account earthquakes of the same intensity, but with different values of the prevailing frequencies of the impact, lead to the differing by several times values of the maximum seismic accelerations at the turbine level and seismic displacements.

Keywords: vibration-insulated turbine unit foundation, response spectrum, seismic stability, earthquake, seismic frequency composition, structural dynamics, seismic calculation

Введение

В наше время большое количество энергетических объектов, в частности электростанций, проектируются и возводятся в районах с высокой сейсмичностью. Одной из главных установок любой электростанции является турбоагрегат, вырабатывающий электроэнергию. Сохранение целостности и работоспособности турбоагрегата во время и после прохождения землетрясения является одной из центральных задач проектирования и расчета виброизолированных фундаментов турбоагрегатов при высоком уровне сейсмичности площадки строительства.

Стоит отметить, что целый ряд атомных электростанций (АЭС), проектируемых сотрудниками корпорации «Росатом»: АЭС «Эль-Дабаа» (Египет), «Пакш-2» (Венгрия), «Аккую» (Турция), «Руппур» (Бангладеш), планируется возводить в районах с высокой сейсмичностью. На всех этих станциях предусмотрены от двух до четырех блоков с турбоагрегатами мощностью 1200 МВт, устанавливаемыми на виброизолированные фундаменты.

При строительстве объектов повышенной ответственности, к которым относятся электростанции большой мощности и все атомные электростанции, проводится микросейсмораионирование, а также определение сейсмических условий площадки строительства. Результатом вышеуказанных работ часто являются спектры исходного сейсмического воздействия для конкретной площадки. Даже для одной и той же площадки в результате нескольких исследований возможно получение принципиально различных

Aleksandr E. Babsky, chief specialist (Structural Dynamics) of the Construction Department – Turbine Island; eLIBRARY SPIN-code: 9620-8675, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8297-1630>.

Vladimir V. Lalin, Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction of the Institute of Civil Engineering, Dr.Sc.; eLIBRARY SPIN-code: 8220-6921, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3850-424X>.

Iliia I. Oleinikov, design engineer of the Construction Department – Turbine Island; eLIBRARY SPIN-code: 5199-3194, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6473-5669>.

Vladimir A. Tarasov, graduate student of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction of the Institute of Civil Engineering; eLIBRARY SPIN-code: 9264-3744, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>.

спектров исходного сейсмического воздействия. При этом даже при совпадении данных интенсивности землетрясения (максимальные сейсмические ускорения) частотный состав может сильно отличаться.

Объектом исследования в данной работе является виброизолированный фундамент турбоагрегата (ФТА), предметом исследования – сейсмостойкость ФТА в зависимости от частотного состава сейсмического воздействия.

Акселерограмма землетрясения – зависимость сейсмического ускорения от времени для фиксированного направления – обычно представляется в виде графика или оцифровки. Важнейшей характеристикой акселерограммы является амплитуда сейсмического ускорения. Ее величина показывает максимальное значение сейсмического ускорения землетрясения. При этом каждому значению сейсмической балльности соответствует свое значение сейсмического ускорения грунта. Для принятой в России шкалы балльности землетрясений MSK-64 расчетными являются землетрясения в 7, 8 и 9 баллов с пиковыми сейсмическими ускорениями 0,1g, 0,2g и 0,4g соответственно.

Колебания конструкций во время землетрясения – динамический процесс, поэтому реакция сооружений зависит не только от величины ускорения, но и в не меньшей степени от частотного состава возмущения [1].

Науке известны случаи, когда землетрясение с пиковыми ускорениями грунта вплоть до 0,4g приводило лишь к умеренным повреждениям сооружений, и наоборот, землетрясения с относительно небольшими ускорениями приводили к сильным разрушениям [1]. Данные факты можно объяснить как раз различными частотными составами сейсмических колебаний грунта. В случае, когда преобладающие частоты сейсмического возмущения близки к частотам основных собственных форм колебаний конструкции, в последней развиваются сильные колебания, несмотря на достаточно невысокие значения сейсмических ускорений грунта.

Частотный состав акселерограммы землетрясения характеризуется ее спектром ответа. Спектр ответа (реакции) – совокупность абсолютных значений максимальных ответных ускорений линейного осциллятора при заданном акселерограммой воздействии с учетом собственной частоты и параметра демпфирования осциллятора.

Для выполнения корректного сравнительного анализа поведения конструкции виброизолированных фундаментов при различных параметрах сейсмического воздействия необходимо все акселерограммы, имеющие различный частотный состав, нормировать на одинаковое значение ускорения. Нормированные акселерограммы описывают землетрясения одинаковой интенсивности, однако из-за различного частотного состава результаты сейсмических расчетов конструкции различны.

Учитывая, что виброизолированные фундаменты турбоагрегатов – это низкочастотные системы с большой массой, очень важно проанализировать, как частотный состав акселерограмм сейсмического воздействия будет влиять на сейсмостойкость фундаментов турбоагрегатов. Данный факт подтверждает актуальность проблемы исследования.

Анализ литературных источников, посвященных сейсмостойкому проектированию и расчету сооружений, конструкций и оборудования электростанций показал широкую освещенность в научной литературе проблем обеспечения сейсмостойкости реакторных отделений АЭС как сооружений наивысшего уровня ответственности. Также в множестве исследований основной упор делается на проблему сейсмостойкости технологического оборудования, чаще всего связанного с безопасностью электростанции. Тем не менее тема сейсмостойкости виброизолированных фундаментов турбоагрегатов в научной литературе широко не представлена, хотя является не менее важной.

Вышеуказанное обстоятельство подтверждает целесообразность проведения исследования, целью которого является определение влияния частотного состава сейсмического воздействия на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- обзор и сравнительный анализ научной литературы в области обеспечения сейсмостойкости сооружений и оборудования энергетических объектов;
- создание конечно-элементной расчетной модели виброизолированного фундамента турбоагрегата с высокой степенью детализации;
- проведение вычислительных экспериментов – выполнение расчетных сопоставлений динамической реакции виброизолированного фундамента турбоагрегата при сейсмическом воздействии с одинаковой интенсивностью, но с различным частотным составом;
- формулировка выводов по влиянию на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов сейсмического воздействия с различным частотным составом.

Первые в Советском Союзе исследования в области сейсмической защиты элементов строительных конструкций проводились в ЦНИИСК под руководством Я.М. Айзенберга [2–3]. Их результаты стали основой для дальнейших научно-методических разработок и инструментальных средств в области сейсмостойкого строительства [4].

Открытие новых и развитие существующих научных разработок в сфере сейсмостойкого строительства тесно связаны с развитием и совершенствованием динамических расчетов, способов математического моделирования в расчетах сооружений, усовершенствованием теорий взаимодействия сооружения с основанием и многим другим.

Среди иностранных и отечественных ученых-исследователей в области сейсмостойкости сооружений следует отметить таких, как Я.М. Айзенберг, А.Н. Бирбраер, И.И. Гольденблат, М.Ф. Барштейн, Б.Г. Коронев, И.М. Рабинович, И.А. Константинов, Н. Ньюмарк, Э. Розенблат, С.Г. Шульман, О.А. Савинов, В.В. Костарев, Ю.Л. Рутман, А.М. Уздин, Т.А. Белаш, А.Г. Тяпин [5–7].

Основные проблемы сейсмостойкого проектирования конструктивных элементов сооружений и технологического оборудования энергетических объектов представлены в работах Т. Хираки (2014), Дж. Чена (2014), М. Кумара, А.С. Уиттакера и М.С. Константину (2015) [8–13].

Отдельные конструктивные решения, приводящие к повышению сейсмостойкости строительных конструкций и оборудования, освещены в работах С. Медель-Вера (2015), И. Политопулоса (2015), М.А. Сайед (2015), Е.С. Фироозабада (2015), З. Чжоу, Дж. Вонганда, С. Махина (2016), В.В. Костарева и П.С. Васильева (2007), А. Часалевриса (2020), У. Яна (2019), П. Вана (2018), М. Ана (2018), Дж. Вонга и С. Махина (2020), С.С. Ю (2018), У.С. Чона (2019) [14–25].

В работах М. Исмаила (2018), П.М. Кальви (2018), Л. Муравьевой и Н. Ватина (2014), Дж. Дражича и Н. Ватина (2016), Ю.Л. Рутмана (2017), А.Е. Саргсяна (2013) [26–31] предложены различные методики динамических расчетов, в том числе с учетом демпфирования. Однако в них даны лишь общие принципы учета сейсмических воздействий без учета особенностей конструкции, а также характеристик сейсмического воздействия, связанных с его частотным составом.

Труды [32–36] посвящены учету различного частотного состава сейсмического воздействия при расчетах сооружений и оборудования. В работах отсутствует явный анализ реакции низкочастотных изолированных систем большой массы на сейсмическое воздействие с разным частотным составом.

В предыдущих работах одного из авторов проведен анализ влияния конструкции виброизолированного фундамента быстроходного турбоагрегата на его сейсмостойкость [37] и предложено инновационное конструктивное решение для здания турбины: двойная система сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата [38].

Таким образом, по итогам обзора научной литературы по теме исследования сделан вывод об отсутствии в настоящий момент решения вопроса влияния различного частотного состава сейсмического воздействия на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов. Это еще раз подтверждает актуальность проводимого исследования.

Методы

Для турбоагрегатов, особенно большой мощности, заводом-изготовителем оборудования обычно ограничивается уровень максимального сейсмического горизонтального ускорения в осевом направлении на отметке установки турбоагрегата. Данное обстоятельство связано с прочностью упорного подшипника турбоагрегата. При работе турбины возникает значительный нагрев и, как следствие, температурные деформации. Для того чтобы температурные деформации не привели к сильным температурным напряжениям и, следовательно, к разрушению машины, все опоры турбоагрегата, кроме одной, проектируются скользящими. Единственный упорный подшипник в случае сейсмических колебаний должен воспринять всю горизонтальную нагрузку в осевом направлении не разрушившись. Именно по этой причине заводы-изготовители мощных турбоагрегатов устанавливают ограничение максимального значения сейсмических ускорений в осевом направлении на отметке установки турбоагрегата: отечественный производитель АО «Силовые машины» (Ленинградский металлический завод, ЛМЗ) ограничивает до 0,2–0,23g, французский производитель GE SPS ограничивает нормальную эксплуатацию величиной 0,1g и обеспечивает целостность турбины до 0,35g.

Также немаловажным критерием сейсмостойкости виброизолированных фундаментов турбоагрегатов является величина максимальных сейсмических смещений. Во-первых, технологические трубопроводы большого диаметра, даже при наличии компенсаторов, при сохранении целостности и герметично-

сти могут смещаться лишь в определенных пределах. Во-вторых, сами изолирующие элементы в зависимости от типа и несущей способности имеют ограничения на смещения. В-третьих, фундамент турбоагрегата при сейсмических колебаниях не должен соударяться с конструкциями отметки обслуживания.

В связи с вышеизложенным в данном исследовании выбрано два набора основных параметров для расчетного сравнения и анализа сейсмостойкости фундамента турбоагрегата:

- значения максимальных сейсмических ускорений в осевом направлении на отметке установки турбоагрегата;

- значения максимальных взаимных сейсмических перемещений: виброизолированного фундамента турбоагрегата – опорные конструкции, фундамент турбоагрегата и отметка обслуживания и конденсаторы – опорные конструкции.

Проведение вычислительных экспериментов принято как основной метод исследования в данной работе.

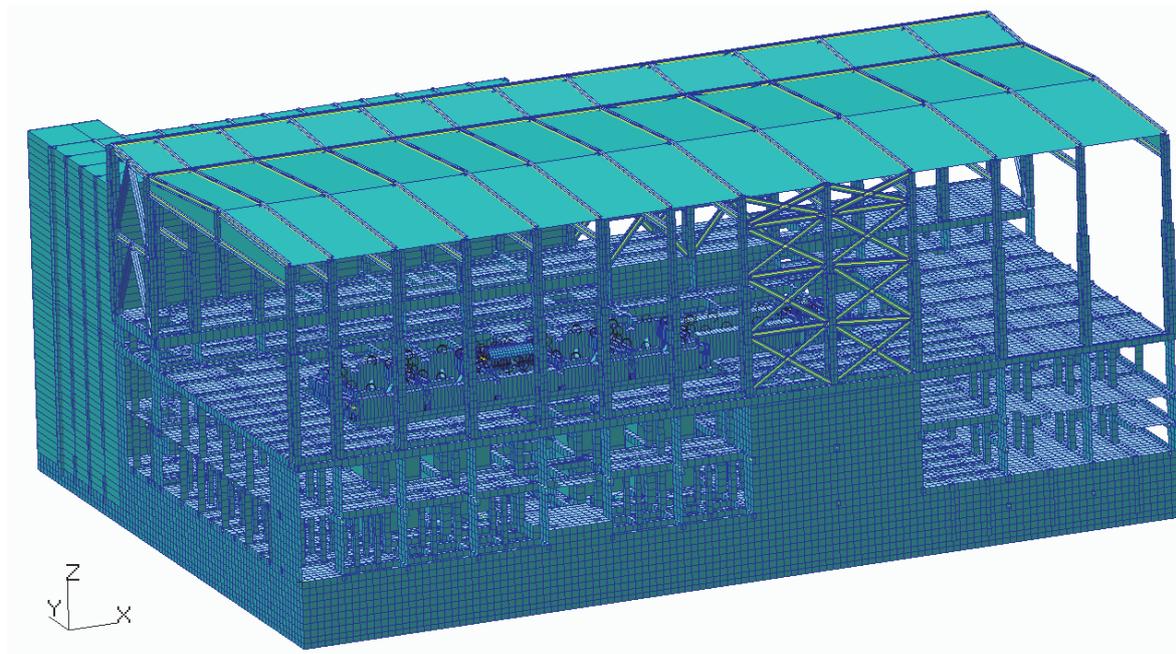


Рис. 1. Конечно-элементная модель здания турбины
[Figure 1. Finite element model of the turbine building]

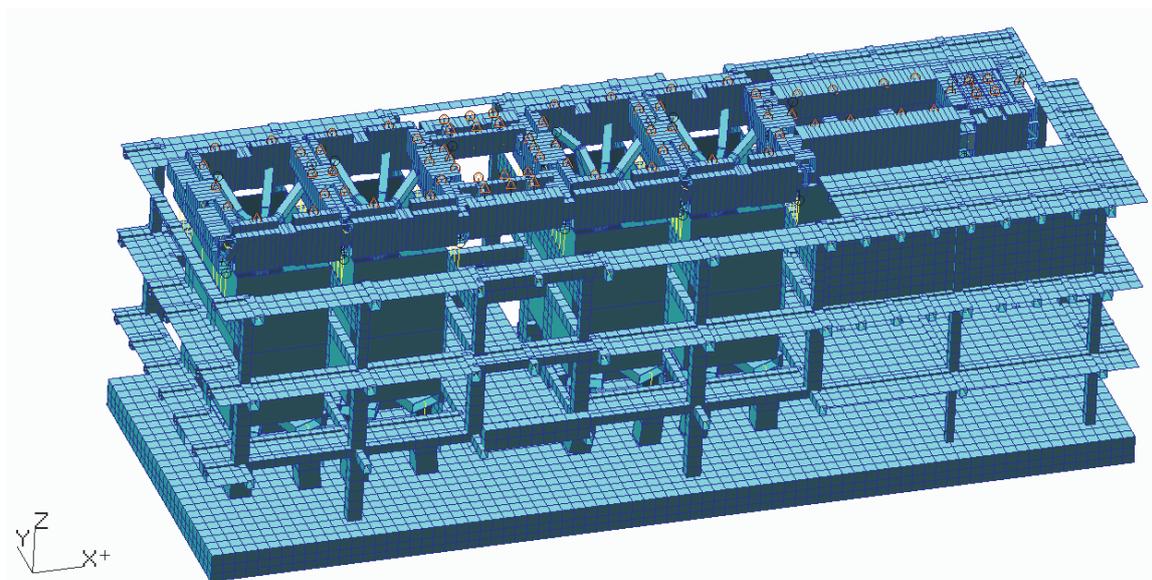


Рис. 2. Конечно-элементная модель фундамента турбоагрегата и опорных конструкций
[Figure 2. Finite element model of the turbine foundation and supporting structures]

Все вычисления производились в MSC/Nastran с применением МКЭ прямым интегрированием уравнений движения. Шаг интегрирования для вычисления спектров 0,001 с, для вычисления перемещений 0,005 с. Конечно-элементная расчетная схема виброизолированного фундамента турбоагрегата в составе здания турбины имеет около 300 000 неизвестных и представлена на рис. 1 и 2. Примыкающие к зданию турбины здания, а также верхняя часть здания турбины моделировались упрощенно для снижения числа неизвестных.

При моделировании расчетной схемы использовались стержневые, пластинчатые, пружинные и специальные конечные элементы. Пружинные изоляторы моделировались пружинными элементами, демпферы – специальными элементами вязкого трения. Турбоагрегат преимущественно моделировался массами.

Общее затухание в системе принято равным 7 %. Коэффициент α в методике Релея принят равным нулю. Общая матрица демпфирования состоит из суммы матрицы затухания Релея и матрицы затухания, полученной из учета сосредоточенных демпферов.

Расчетные схемы для всех восьми расчетов были идентичны.

Для проведения вычислительных экспериментов использовались трехкомпонентные акселерограммы, отдельно по направлению глобальных осей X , Y и Z , нормированные на 0,1g, синтезированные из восьми различных спектров. В качестве динамических характеристик основания приняты характеристики, соответствующие «среднему» грунту, свойства которого указаны в табл. 1. Затухание в грунтах основания ограничивалось величинами: $\xi_z = 0,35$, $\xi_x = 0,15$, $\xi_\phi = 0,15$.

В табл. 2 представлено краткое описание каждого из восьми спектров. Графически спектры по направлению глобальной оси X (в осевом направлении по отношению к фундаменту турбоагрегата) представлены на рис. 3.

Таблица 1

Свойства грунтов основания
[Table 1. Characteristics of base soils]

Наименование [Description]	Модуль сдвига G , МПа [Shear modulus G , MPa]	Коэффициент Пуассона, ν [Poisson's ratio, ν]	Плотность, ρ , кг/м ³ [Density, ρ , kg/m ³]	Модуль деформации, E_d , МПа [Deformation modulus, E_d , MPa]
Глинистые грунты полутвердые («средний» грунт) [Semisolid clayey soils ("medium" soil)]	6350	0.27	2200	150

Таблица 2

Различные спектры сейсмического воздействия
[Table 2. Different spectra of seismic impact]

№	Обозначение [Designation]	Описание [Description]
1	—1_NP	Сейсмический спектр из НП-031-01 (Россия) [Seismic spectrum from NP-031-01 (Russia)]
2	—2_RG	Сейсмический спектр NRC, RG 1.60 (США) [Seismic spectrum NRC, RG 1.60 (USA)]
3	—3_HAF	Сейсмический спектр HAF0101 (Китай) [Seismic spectrum HAF0101 (China)]
4	—4_NE	Сейсмический спектр соответствует сейсмическому микрорайонированию площадки в Северной Европе [The seismic spectrum corresponds to the seismic microzoning of the site in Northern Europe]
5	—5_CE	Сейсмический спектр соответствует сейсмическому микрорайонированию площадки в Центральной Европе, тип 1 [The seismic spectrum corresponds to the seismic microzoning of the site in Central Europe, type 1]
6	—6_CE*	Сейсмический спектр соответствует сейсмическому микрорайонированию площадки в Центральной Европе, тип 2 [The seismic spectrum corresponds to the seismic microzoning of the site in Central Europe, type 2]
7	—7_FA	Сейсмический спектр соответствует сейсмическому микрорайонированию площадки в Передней Азии, тип 1 [The seismic spectrum corresponds to the seismic microzoning of the site in Western Asia, type 1]
8	—8_FA*	Сейсмический спектр соответствует сейсмическому микрорайонированию площадки в Передней Азии, тип 2 [The seismic spectrum corresponds to the seismic microzoning of the site in Western Asia, type 2]

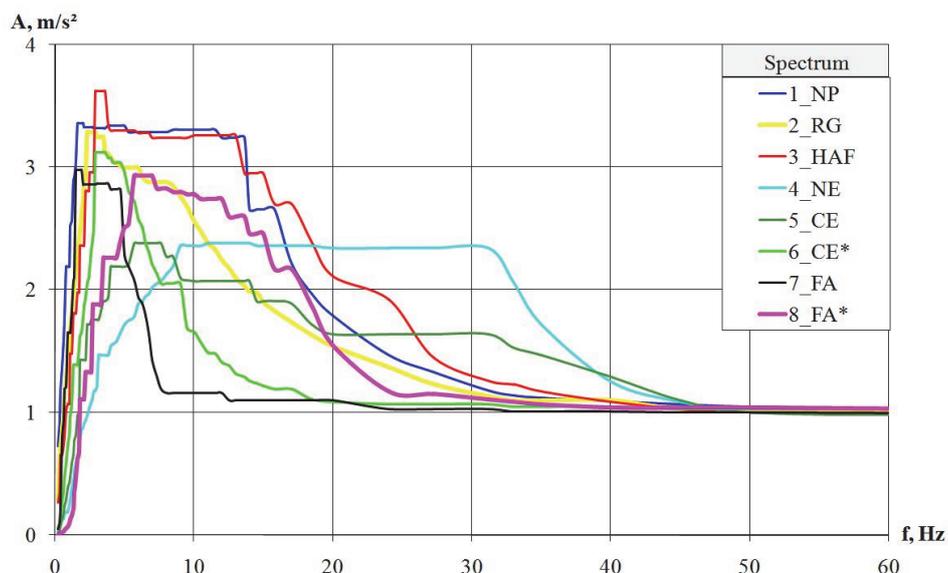


Рис. 3. Спектры сейсмического воздействия по оси X
[Figure 3. Spectra of seismic action along the X axis]

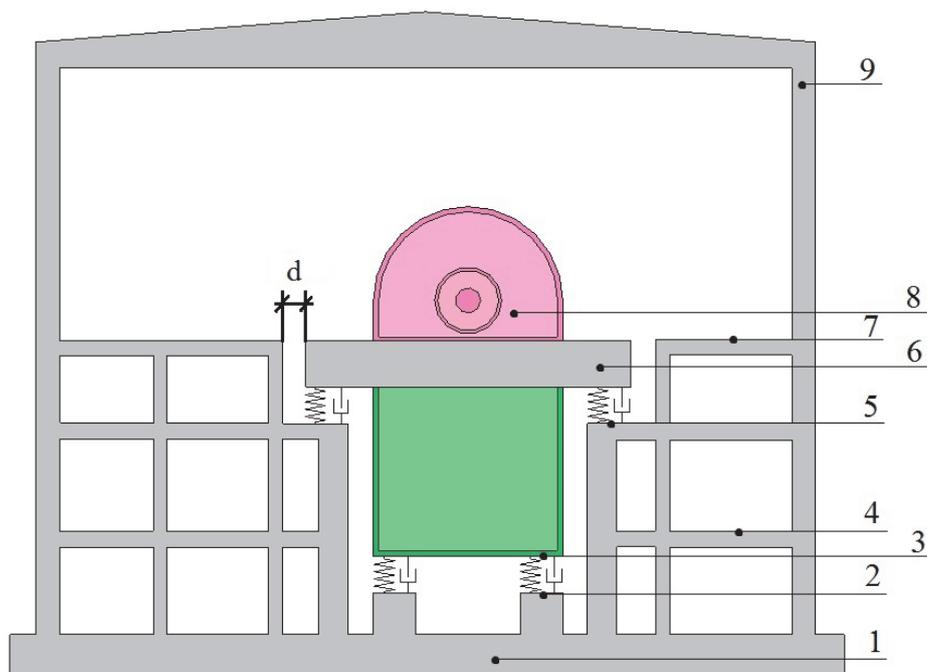


Рис. 4. Поперечный разрез здания турбины с виброизолированным фундаментом турбоагрегата:

1 – уровень нижней фундаментной плиты; 2 – отметка установки изоляторов под конденсаторами; 3 – отметка установки конденсаторов; 4 – уровень промежуточного перекрытия; 5 – отметка установки изоляторов под ФТА (верхняя поверхность подопорных конструкций); 6 – уровень ФТА; 7 – отметка обслуживания; 8 – отметка расположения оборудования; 9 – отметка установки мостового крана большой грузоподъемности

[Figure 4. Cross section of the turbine building with the vibration-insulated turbine foundation:

1 – level of the lower foundation slab; 2 – level of the installation of insulators under the capacitors; 3 – level for the installation of capacitors; 4 – intermediate floor level; 5 – level of installation of insulators under turbine unit foundation (upper surface of support structures); 6 – turbine unit foundation level; 7 – service floor level; 8 – equipment location level; 9 – level of installation of a heavy-duty overhead crane]

Схематично поперечный разрез виброизолированного фундамента турбоагрегата в составе здания турбины с уровнями вычисления спектров сейсмических ускорений представлен на рис. 4. С точки зрения прочности турбоагрегата интересны уровни 3 и 8, уровни 2 и 3, 5 и 6 характеризуют изменения сейсмических ускорений при прохождении через сейсмоизолирующий слой, остальные уровни были включены в расчет для полноты исследования сейсмического поведения всего здания турбины в целом.

Для комплексного анализа сейсмических ускорений на отметке установки турбоагрегата и других отметках были вычислены спектры отклика сейсмических ускорений.

Сейсмические перемещения определялись как взаимные смещения узлов над и под изоляторами (деформации изоляторов), а также как взаимные смещения нескольких пар точек, расположенных на фундаменте турбоагрегата и отметке обслуживания соответственно.

Результаты и обсуждение

В связи с тем, что для фундаментов турбоагрегатов критичным с точки зрения сейсмических ускорения является осевое направление (направление по глобальной оси X расчетной схемы), ниже представлены вычисленные спектры именно для него.

При частотах выше некоторого предела $f = f_{\text{УНП}}$ ускорения при любых затуханиях одинаковы и равны значению, именуемому ускорением нулевого периода (УНП). Это значит, что в диапазоне частот выше $f_{\text{УНП}}$ осциллятор реагирует на возмущение практически как твердое тело («осциллятор с периодом равным нулю»), его относительные ускорения пренебрежимо малы. Иными словами, закон колебаний его массы аналогичен акселерограмме. При землетрясении значение частоты $f_{\text{УНП}}$ обычно меньше либо равно 33 Гц [1].

Результаты расчетов спектров сейсмических ускорений в осевом направлении при 5 %-ном затухании представлены на рис. 5 и в табл. 3. Результаты вычисления максимальных сейсмических смещений представлены в табл. 4. На рис. 5 цвета каждого графика соответствуют цветам спектров воздействий, представленным в табл. 2 и на рис. 3.

Анализируя результаты, представленные в табл. 3, видим, что при максимальной амплитуде сейсмического ускорения исходных акселерограмм, равной 1 м/с^2 ($0,1 \text{ g}$), уже на нижней плите здания турбины появляется разница в амплитудах сейсмических ускорений до 40 %. Расчетная модель здания турбины имеет сложную конфигурацию, несовпадение центра масс, центра жесткости и геометрического центра, что приводит к отсутствию явных форм колебаний в осевом направлении (по глобальной оси X). Если проанализировать накопление модальной нагрузки по направлению глобальной оси X с увеличением частоты, для данной расчетной схемы увидим следующее: к частоте 9,0 Гц накапливается 50 % модальной нагрузки, к частоте 20,5 Гц – 70 %, к частоте 24,7 Гц – 90 %.

Таблица 3

УНП в осевом направлении, м/с^2
[Table 3. Zero period acceleration in the axial direction, m/s^2]

Отметка [Level]	1_NP	2_RG	3_HAF	4_NE	5_CE	6_CE*	7_FA	8_FA*
1 – нижняя плита [bottom plate]	1,31	1,18	1,42	1,40	1,13	1,04	0,97	1,01
2 – отметка установки изоляторов под конденсаторами [level of insulators installation under the condensers]	2,40	2,04	2,22	2,73	1,97	1,38	1,12	1,68
3 – на конденсаторах [on the condensers]	1,92	1,59	1,78	1,61	1,36	1,14	1,17	1,08
4 – перекрытие промежуточное [intermediate floor]	5,28	4,18	5,24	3,77	3,74	3,79	2,77	4,17
5 – отметка установки изоляторов под ФТА [level of insulators installation under turbine unit foundation]	5,73	5,13	6,05	4,42	4,26	5,16	3,90	4,56
6 – ФТА [Turbine unit foundation]	2,50	1,96	1,66	0,96	1,01	1,54	1,68	0,97
7 – отметка обслуживания [service level]	6,67	5,65	6,67	4,63	4,66	5,38	4,04	5,14
8 – на оборудовании [on the equipment]	2,60	2,02	1,77	1,01	1,08	1,58	1,65	1,06
9 – верх колонн [top of columns]	6,84	6,00	7,18	5,67	5,24	5,35	3,71	5,61

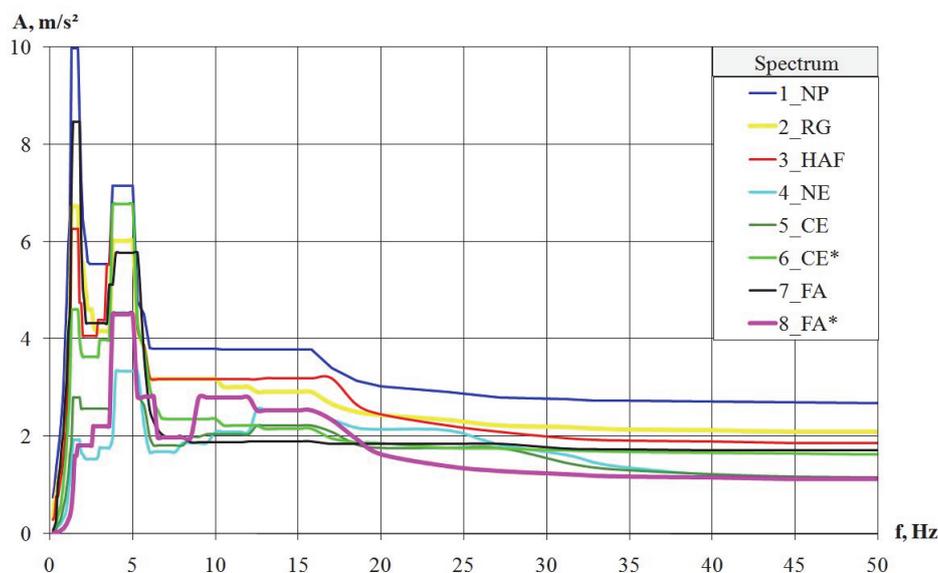


Рис. 5. Спектр отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении
 [Figure 5. Seismic accelerations response spectrum at the equipment level in the axial direction]

Таким образом, основной вклад в колебания здания турбины в осевом направлении для выбранных динамических характеристик основания преимущественно обуславливается формами с частотами от 3 до 25 Гц. В связи с этим акселерограммы, синтезированные из спектров, имеющих в вышеуказанном диапазоне большие ускорения (1_NP, 3_HAF, 4_NE), вызывают больший отклик сейсмических ускорений на фундаментной плите здания турбины, нежели остальные. Аналогично можно сказать и об остальных отметках здания турбины.

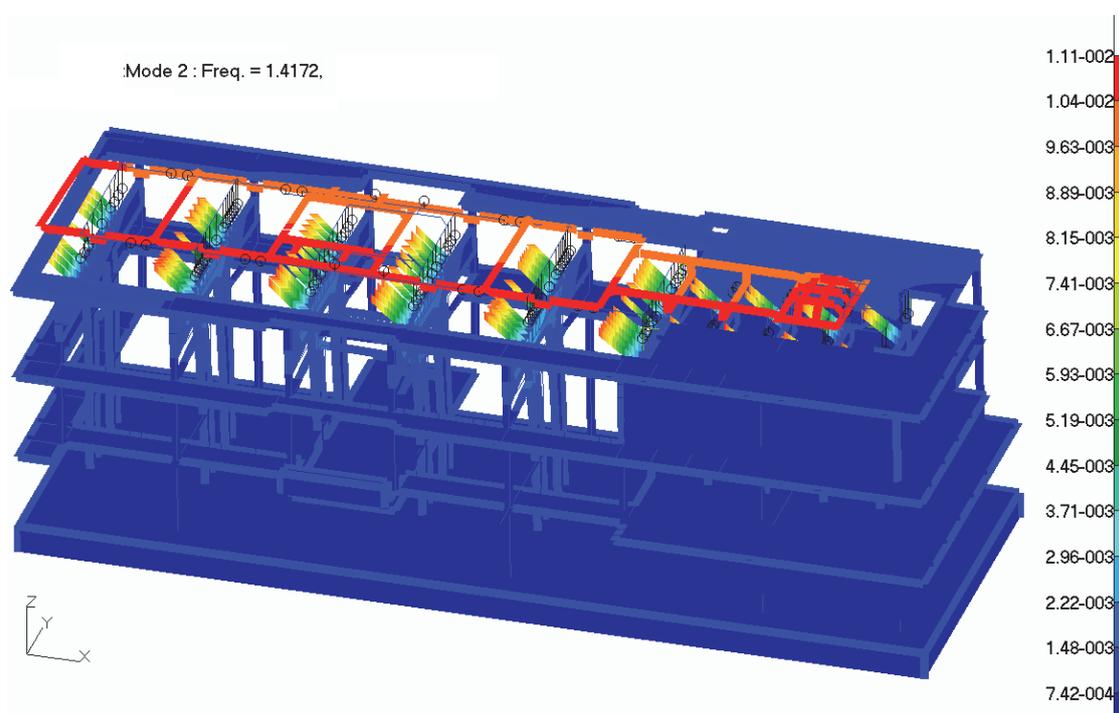


Рис. 6. Основная форма колебаний виброизолированного фундамента турбоагрегата в осевом направлении
 [Figure 6. The fundamental mode of the vibration-insulated turbine foundation in the axial direction]

Для большинства виброизолированных фундаментов турбоагрегатов частоты основных форм колебаний в осевом направлении находятся в диапазоне 1–4 Гц. На рис. 6 представлена основная форма колебаний виброизолированного фундамента турбоагрегата в осевом направлении, укрупненно показан

виброизолированный фундамент и подопорные конструкции. Частота, соответствующая данной форме для конкретной расчетной схемы, составляет 1,42 Гц. На данной частоте спектр 1_NP имеет пиковое значение ускорения $2,75 \text{ м/с}^2$, что приводит к максимальному полученному значению отклика ФТА в осевом направлении, равному $2,6 \text{ м/с}^2$ ($0,26g$). Спектр 2_RG на частоте 1,42 Гц имеет пиковое значение ускорения $2,07 \text{ м/с}^2$ что приводит к значению отклика ФТА в осевом направлении, равному $2,0 \text{ м/с}^2$ ($0,2g$). В свою очередь, спектры 4_NE, 5_CE и 8_FA* имеют максимальные пики в диапазоне частот выше 4 Гц, а на частоте 1,42 Гц имеют ускорения $0,51$; $0,78$ и $0,35 \text{ м/с}^2$ соответственно. Данные относительно «невые» значения приводят к значению отклика ФТА в осевом направлении около $1,0 \text{ м/с}^2$ ($0,1g$).

Таблица 4

Максимальные сейсмические перемещения, мм
[Table 4. Maximum seismic displacements, mm]

Пара узлов [Pair of nodes]	1_NP	2_RG	3_HAF	4_NE	5_CE	6_CE*	7_FA	8_FA*
Виброизолятор под конденсатором [Vibration isolator under the condenser]	14,6	11,0	7,5	2,9	4,5	7,0	10,2	3,7
Виброизолятор под ФТА [Vibration isolator under the turbine unit foundation]	45,8	42,5	32,2	12,7	21,3	29,6	34,7	16,2
Отметка обслуживания ФТА [Turbine unit foundation service level]	53,0	49,5	34,6	15,8	24,3	34,5	38,1	20,1

Качественно картина деформаций изоляторов и взаимных смещений пар точек, находящихся на фундаменте турбоагрегата и на отметке обслуживания, повторяет картину распределения откликов сейсмических ускорений по отметкам здания турбины. Большие ускорения вызывают большие инерционные силы и, как следствие, большие перемещения. Например, наибольшее значение ускорения на ФТА, равное $2,5 \text{ м/с}^2$ и достигающееся при воздействии 1_NP, приводит к деформациям в верхних изоляторах до 45,8 мм. В свою очередь, воздействие 4_NE и соответствующее ему ускорение на ФТА, равное $1,0 \text{ м/с}^2$, приводит к деформациям верхних изоляторов лишь до 12,7 мм.

Заключение

Исходя из полученных результатов исследования, можно заключить следующее:

1. При выполнении сейсмического расчета виброизолированного фундамента турбоагрегата на акселерограммы с одинаковой интенсивностью – максимальным значением сейсмического ускорения, равным 1 м/с^2 ($0,1g$), но с различными значениями преобладающих частот воздействия, получены значения отклика сейсмических ускорений на фундаменте в осевом направлении, отличающиеся более чем в 2,5 раза. Сейсмические перемещения конструкции виброизолированного фундамента при этом отличаются по значению более чем в 3 раза.

2. Вышеизложенный факт свидетельствуют о значительном влиянии различного частотного состава сейсмического воздействия на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов. По этой причине особенно важно в самом начале проектирования виброизолированного фундамента турбоагрегата не только учесть величину максимального ускорения исходного сейсмического воздействия, но и детально изучить частотный состав сейсмического воздействия.

3. Сейсмический спектр, указанный в НП-031-01, имеет чрезвычайно широкий диапазон частот, соответствующий пиковым ускорениям, что приводит к сильному консерватизму при его использовании в части сейсмостойкости виброизолированных фундаментов турбоагрегатов. Его можно использовать на стадии обоснования инвестиций и при разработке проектов унифицированных блоков атомных станций, однако на стадиях проекта и рабочего проектирования необходимо использовать сейсмические спектры конкретной площадки строительства.

Список литературы / References

1. Birbraer A.N. *Raschet konstrukcij na sejsmostojkost'* [Seismic analysis of structures]. Saint Petersburg: Nauka Publ.; 1998. (In Russ.)

Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. 255 с.

2. Smirnov V.I. Seysmoizolyatsiya-innovatsionnaya tekhnologiya zashchity vysotnykh zdaniy ot zemletryaseniy v Rossii i za rubezhom [Seismic isolation – an innovative technology for protecting high-rise buildings from earthquakes in Russia and abroad]. TsNIISK imeni V.A. Kucherenko 80 let [80 years of the Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko]. Moscow; 2007. p. 24–32. (In Russ.)

Смирнов В.И. Сейсмоизоляция – инновационная технология защиты высотных зданий от землетрясений в России и за рубежом // ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко 80 лет: сборник статей. М., 2007. С. 24–32.

3. Smirnov V.I. Sovremennaya zashchita ot zemletryaseniy [Modern protection against earthquakes]. *High rise buildings*. 2008;(4):110–115. (In Russ.)

Смирнов В.И. Современная защита от землетрясений // Высотные здания. 2008. Вып. 4. С. 110–115.

4. Auzenberg Ya.M., Nejman A.I., Abakarov A.D. Adaptivnyye sistemy seismicheskoy zashchity sooruzheniy [Adaptive seismic protection systems for structures]. Moscow: Nauka Publ.; 1978. (In Russ.)

Айзенберг Я.М., Нейман А.И., Абакаров А.Д. Адаптивные системы сейсмической защиты сооружений. М.: Наука, 1978. 246 с.

5. Rutman Yu.L., Ostrovskaya N.V. *Dinamika sooruzhenij: sejsmostokost', sejsmozashchita, vetrovye nagruzki* [Dynamics of structures: seismic capacity, seismic protection, wind load]. Saint Petersburg: SPbGASU; 2019. (In Russ.)

Рутман Ю.Л., Островская Н.В. Динамика сооружений: сейсмостокость, сейсмозащита, ветровые нагрузки: монография. СПб.: СПбГАСУ, 2019. 253 с.

6. Uzdin A.M., Elizarov S.V., Belash T.A. *Sejsmostojkie konstrukcii transportnyh zdaniy i sooruzhenij* [Seismic resistant structures of transport buildings and structures]. Moscow: Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport; 2012. (In Russ.)

Уздин А.М., Елизаров С.В., Белаиш Т.А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений: учебное пособие. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 501 с.

7. Tyarin A.G. *Raschyot sooruzhenij na sejsmicheskoe vozdejstvie s uchyotom vzaimodejstviya s gruntovym osnovaniem* [Calculation of the structure for seismic impact, taking into account the impact with a soil base]. Moscow: ACB Publ.; 2013. (In Russ.)

Тягин А.Г. Расчет сооружений на сейсмическое воздействие с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. М.: АСВ, 2013. 392 с.

8. Hiraki T., Nagata S., Kanazawa K., Imaoka T., Nakayama T., Umeki Y., Jimbo M., Shimizu H. *Development of an evaluation method for seismic isolation systems of nuclear power facilities. Part 9. Ultimate properties of full-scale lead rubber bearings based on breaking test*. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP; 2014. <https://doi.org/10.1115/PVP2014-29001>

9. Chen J., Zhao C., Xu Q., Yuan C. Seismic analysis and evaluation of the base isolation system in AP1000 NI under SSE loading. *Nuclear Engineering and Design*. 2014;278:117–133. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.07.030>

10. Anand V., Satish Kumar S.R. Seismic soil-structure interaction: a state-of-the-art review. *Structures*. 2018;16:317–326. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.10.009>

11. Kumar M., Whittaker A.S., Constantinou M.C. An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2014. <https://doi.org/10.1002/eqe.2431>

12. Kumar M., Whittaker A.S., Constantinou M.C. Extreme earthquake response of nuclear power plants isolated using sliding bearings. *Nuclear Engineering and Design*. 2017;316:9–25. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.030>

13. Kumar M., Whittaker A.S., Constantinou M.C. Response of base-isolated nuclear structures to extreme earthquake shaking. *Nuclear Engineering and Design*. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.06.005>

14. Medel-Vera C., Ji T. Seismic protection technology for nuclear power plants: a systematic review. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2015;52(5):607–632. <https://doi.org/10.1080/00223131.2014.980347>

15. Politopoulos I., Sergis I., Wang F. Floor response spectra of a partially embedded seismically isolated nuclear plant. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015;78:213–217. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.06.017>

16. Sayed M.A., Go S., Cho S.G., Kim D. Seismic responses of base-isolated nuclear power plant structures considering spatially varying ground motions. *Structural Engineering and Mechanics*. 2015;54(1):169–188. <https://doi.org/10.12989/sem.2015.54.1.169>

17. Firoozabad E.S., Jeon B.G., Choi H.S., Kim N.S. Seismic fragility analysis of seismically isolated nuclear power plants piping system. *Nuclear Engineering and Design*. 2015;284:264–279. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.12.012>

18. Zhou Z., Wong J., Mahin S. Potentiality of using vertical and three-dimensional isolation systems in nuclear structures. *Nuclear Engineering and Technology*. 2016;48(5):1237–1251. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.03.005>

19. Kostarev V.V., Petrenko A.V., Vasilyev P.S. An advanced seismic analysis of an NPP powerful turbogenerator on an isolation pedestal. *Nuclear Engineering and Design*. 2007;237(12–13):1315–1324. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.10.004>

20. Chasalevris A. Stability and Hopf bifurcations in rotor-bearing-foundation systems of turbines and generators. *Tribology International*. 2020;145:106154. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106154>

21. Yang Y., Bashir M., Li C., Wang J. Analysis of seismic behaviour of an offshore wind turbine with a flexible foundation. *Ocean Engineering*. 2019;178:215–228. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.02.077>

22. Wang P., Zhao M., Du X., Liu J., Xu C. Wind, wave and earthquake responses of offshore wind turbine on monopile foundation in clay. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018;113:47–57. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.028>
23. Najafijozani M., Becker T.C., Konstantinidis D. Evaluating adaptive vertical seismic isolation for equipment in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2020;358. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110399>
24. Yu C.C., Bolisetti C., Coleman J.L., Kosbab B., Whittaker A.S. Using seismic isolation to reduce risk and capital cost of safety-related nuclear structures. *Nuclear Engineering and Design*. 2018;326:268–284. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.11.016>
25. Jeong Y.S., Baek E.R., Jeon B.G., Chang S.J., Park D.U. Seismic performance of emergency diesel generator for high frequency motions. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019;51(5):1470–1476. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.03.012>
26. Ismail M. Seismic isolation of structures. Part I. Concept, review and a recent development. *Hormigón y Acero*. 2018;69(285):147–161. <https://doi.org/10.1016/j.hya.2017.10.002>
27. Calvi P.M., Calvi G.M. Historical development of friction-based seismic isolation systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018;106:14–30. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.003>
28. Muravyeva L., Vatin N. Risk assessment for a main pipeline under severe soil conditions on exposure to seismic forces. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;635–637:468–471. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.468>
29. Dražić J., Vatin N. The Influence of Configuration on to the Seismic Resistance of a Building. *Procedia Engineering*. 2016;165:883–890. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.788>
30. Vatin N.I., Ivanov A.Yu., Rutman Y.L., Chernogorskiy S.A., Shvetsov K.V. Earthquake engineering optimization of structures by economic criterion. *Magazine of Civil Engineering*. 2017;8:67–83. <https://doi.org/10.18720/MCE.76.7>
31. Sargsyan A.E. *Dinamika i seismostoykost' sooruzhenii atomnykh stantsii* [Dynamics and seismic stability of nuclear power plant structures]. Sarov: RFNC-VNIIEF; 2013. (In Russ.)
Саргсян А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций. Саров: ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», 2013. 550 с.
32. Cho S.G., Kim D., Chaudhary S. A simplified model for nonlinear seismic response analysis of equipment cabinets in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2011;241(8):2750–2757. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.06.026>
33. Salman K., Gook Cho S. Effect of frequency content of earthquake on the seismic response of interconnected electrical equipment. *CivilEng*. 2020;1(3):198–215. <https://doi.org/10.3390/civileng1030012>
34. Zhang Y. Effect of seismic frequency spectra on surrounding rock damage evolution of large underground caverns. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018;1–13. <https://doi.org/10.1155/2018/3265460>
35. Short S., Hardy G., Merz K., Johnson J. *Effect of seismic wave incoherence on foundation and building response*. Washington, DC: The US Department of Energy; 2005
36. Bulushev S.V. Comparison of the results of calculating structures for given accelerograms by nonlinear static and nonlinear dynamic methods. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018;14(5):369–378. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-5-369-378>
- Булусhev С.В. Сравнение результатов расчета сооружений на заданные акселерограммы нелинейным статическим и нелинейным динамическим методами // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 5. С. 369–378. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-5-369-378>
37. Tarasov V. Ensuring seismic stability of the vibration-insulated foundation of the turbine unit. *Natural and Technological Risks. Building Safety*. 2020;(1):44–47.
- Тарасов В.А. Обеспечение сейсмостойкости виброизолированного фундамента турбоагрегата // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 44–47.
38. Tarasov V.A. Double seismic insulation system of turbine unit foundation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020;91:9101. <https://doi.org/10.18720/CUBS.91.1>
- Тарасов В.А. Двойная система сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2020. Вып. 91. Статья № 9101. <https://doi.org/10.18720/CUBS.91.1>