



СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

ISSN 2618-9283

DOI 10.37153/2618-9283

EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTIONS SAFETY



05 2021

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
www.seismoconstruction.ru



Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений **Научно-технический журнал**

«Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений» – сетевое научно-техническое рецензируемое издание, охватывающее весь спектр вопросов в области проектирования, строительства, эксплуатации объектов в сейсмически опасных районах России и стран СНГ.

Миссия журнала – развитие строительной науки в области сейсмостойкого строительства; публикация материалов и результатов фундаментальных исследований и достижений ученых, специалистов в области надежности и безопасности зданий и сооружений.

В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);

2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);

2.8.10 – Охрана труда, промышленная безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях (недропользование);

2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки);

1.6.1 – Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки);

1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки).

Включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. В действующем Перечне от 22.10.2021 г. года под номером 2056.

С 24 мая 2021 года журнал входит в Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science. Журнал принимает к публикации: оригинальные статьи, обзоры, дискуссионные материалы, комментарии, рецензии, информационные материалы.

ISSN: 2618-9283 (online) DOI: 10.37153/2618-9283

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77-72754 от 17.05.2018 года. Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Издатель – Российская Ассоциация по сейсмостойкому строительству и защите от природных и техногенных воздействий (РАСС) (<http://raee.su>).

Учредитель – А.А. Бубис.

Сайт сетевого издания: <http://seismoconstruction.ru>

Адрес издательства и редакции: 109428, город Москва, ул. 2-я Институтская, дом 6, строение 37.

Телефон: 8-499-174-75-82; 8-499-174-70-65. E-mail: info@raee.su

Периодичность: 6 раз в год

Даты выхода в свет: 25 февраля, 25 апреля, 25 июня, 25 августа, 25 октября, 25 декабря.

Earthquake Engineering. Constructions Safety **Scientific and technical journal**

«Earthquake engineering. Constructions Safety» is a network scientific and technical peer-reviewed publication covering the entire range of issues in the field of design, construction, and operation of facilities in seismically dangerous areas of Russia and the CIS countries.

The mission of the journal is to develop the science of earthquake-resistant construction; to publish materials and results of fundamental research and achievements of scientists in the field of reliability and safety of buildings and structures.

The journal publishes articles on the following scientific specialties and related branches of science:

2.1.1 – Building structures, buildings and structures (technical sciences);

2.1.2 – Foundations, underground structures (technical sciences);

2.8.10 – Labor protection, industrial safety, safety in emergency situations (subsurface use);

2.4.9 – Nuclear power plants, fuel cycle, radiation safety (technical sciences);

1.6.1 – General and regional geology. Geotectonics and geodynamics science (geological and mineralogical sciences);

1.6.7 – Engineering geology, permafrost and soil science (geological and mineralogical sciences).

Included in the List of peer-reviewed scientific publications, where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of candidate of Sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of Sciences, approved by Supreme Attestation Commission (VAK) of the Ministry of education and science.

In the current List of 22.10.2021 listed under the 2056 position.

Since May 24, 2021 included in the Russian Science Citation Index (RSCI) on the Web of Science platform.

The journal accepts for publication: original articles, reviews, discussion materials, comments, reviews, informational materials.

ISSN: 2618-9283 (online) **DOI:** 10.37153/2618-9283

Certificate of registration EL № FS 77-72754 dated 17.05.2018. Registered by the Federal service for supervision of communications, information technologies and mass communications (Roskomnadzor).

Publisher: Russian Association for earthquake-resistant construction and protection from natural and manmade hazards (RAEE) (<http://raee.su>).

The Founder: A. A. Bubis.

Website of the online publication: <http://seismoconstruction.ru>

Address of the publishing house and editorial office: 109428, Moscow, ul. 2-ya Institut'skaya, house 6, building 37. Phone: 8-499-174-75-82; 8-499-174-70-65. E-mail: info@raee.su

Frequency: 6 times a year. **Release dates:** February 25, April 25, June 25, August 25, October 25, December 25.

Главный редактор

Ведяков И. И., доктор технических наук, профессор (Москва, Российская Федерация)

Заместитель главного редактора

Бубис А. А. (Москва, Российская Федерация)

Ответственный секретарь редколлегии

Смирнова Л. Н., кандидат технических наук (Москва, Российская Федерация)

Редакционная коллегия

Акулов Н.И., доктор геолого-минералогических наук (Иркутск, Российская Федерация)

Алешин А.С., доктор физико-математических наук (Москва, Российская Федерация)

Белаш Т.А., доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Вада Акира, доктор, профессор (Токио, Япония)

Вознесенский Е.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор (Москва, Российская Федерация)

Гусев Б.В., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН (Москва, Российская Федерация)

Захаров В.С., доктор геолого-минералогических наук, профессор (Москва, Российская Федерация)

Ильичев В.А., доктор технических наук, профессор, Академик РААСН (Москва, Российская Федерация)

Клементе Паоло, доктор, профессор (Рим, Италия)

Кривцов Ю.В., доктор технических наук, профессор (Москва, Российская Федерация)

Лалин В.А., кандидат технических наук, профессор (Алматы, Республика Казахстан)

Немчинов Ю.И., доктор технических наук, профессор (Киев, Республика Украина)

Норузинежад Фарсанги Исан, доктор, профессор (Керман, Иран)

Павленко О.В., доктор физико-математических наук, (Москва, Российская Федерация)

Римшин В.И., доктор технических наук, профессор (Москва, Российская Федерация)

Семенов В.А., доктор технических наук, профессор (Москва, Российская Федерация)

Тонких Г.П., доктор технических наук, профессор (Москва, Российская Федерация)

Уздин А.М., доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Хакимов Ш.А., кандидат технических наук, профессор (Ташкент, Республика Узбекистан)

Хачиян Э.Е., доктор технических наук, профессор (Ереван, Республика Армения)

Чеверев В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор (Москва, Российская Федерация)

Чимелларо Джан Паоло, адъюнкт-профессор (Турин, Италия)

Эмри И., доктор, профессор (Любляна, Республика Словения)

«EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTIONS SAFETY»

Editor-in-Chief

Vedyakov I.I., DSc, Professor, (Moscow, Russian Federation)

Deputy editor-in-Chief

Bubis A.A., (Moscow, Russian Federation)

Executive Secretary

Smirnova L.N., PhD (Moscow, Russian Federation)

Editorial board

Akulov N.I., DSc in Geology, Professor (Irkutsk, Russian Federation)

Aleshin A.S., DSc in Mathematics and Physics, Professor (Moscow, Russian Federation)

Belash T.A., DSc, Professor (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Wada Akira, PhD, Professor Emeritus (Tokyo, Japan)

Voznesenskii E.A., DSc in Geology, Professor
(Moscow, Russian Federation)

Gusev B.V., DSc, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Zakharov V.S., DSc in Geology, Professor (Moscow, Russian Federation)

Il'ichev V.A., DSc, Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

Clemente Paolo, PhD, Professor (Rome, Italy)

Krivtsov Yu.V., DSc, Professor (Moscow, Russian Federation)

Lapin V.A., PhD, Professor (Almaty, Republic of Kazakhstan)

Nemchinov Yu.I., DSc, Professor (Kiev, Ukraine)

Noroozinejad Farsangi Ehsan, PhD of Civil Engineering, Professor (Kerman, Iran)

Pavlenko O.V., DSc in Mathematics and Physics
(Moscow, Russian Federation)

Rimshin V.I., DSc, Professor (Moscow, Russian Federation)

Semenov V.A., DSc, Professor (Moscow, Russian Federation)

Tonkikh G.P., DSc, Professor (Moscow, Russian Federation)

Uzdin A.M., DSc, Professor (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Khakimov Sh., PhD, Professor (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Khachiyani E.E., DSc, Professor (Yerevan, Republic of Armenia)

Cheverev V.G., DSc in Geology, Professor (Moscow, Russian Federation)

Cimellaro Gian Paolo, Associate Professor (Turin, Italy)

Emri Igor, PhD, Professor (Ljubljana, Republic of Slovenia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 5 – 2021

Сейсмический риск и ущерб**Лапин В.А., Нурсафин Р.Е., Пак Э.Ф. 8**

Оценка надежности многоэтажного здания в соответствии с принципами Еврокода

Техническое регулирование и развитие норм проектирования**Оганесян С. М., Карапетян Дж. К., Геодакян Э. Г.,
Саакян Б. В. 22**

О необходимости изменения расчетных схем на сейсмостойкость в строительных нормах и правилах (СНиП)

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений**Бабский А.Е., Тарасов В.А. 36**

Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов

Белаш Т.А., Дымов Е. А. 50

Реализация принципов сейсмоизоляции для эффективной сейсмозащиты нефтегазовых сооружений

Белаш Т.А., Свитлик И.В. 64

Перспективное использование конструктивных систем зданий подвешенного типа в сейсмических районах

Афанасьев Н.А. 73

Сравнение работы двух конструкций инженерной защиты в сейсмически активном районе на примере объекта «Инженерная противооползневая защита северного склона хребта Псехако»

Фотографии на обложке номера – рабочие моменты конференции

CONTENTS

№ 5 – 2021

Seismic risk and damage

- V.A. Lapin, R.E. Nursafin, A.F. Pak** **8**
Assessment of reliability of multi-storey building in accordance with Eurocode principles

Technical regulation and design standards development

- S. M. Hovhannisyan, J.K. Karapetyan, E.G. Geodakyan, B.V.Sahakyan** **22**
On the need to change the calculation schemes for seismic resistance in building codes and rules (BRandR)

Seismic safety and seismic isolation of buildings

- A.E. Babsky, V.A. Tarasov** **36**
Seismic stability of vibration-insulated turbine foundations

- T.A. Belash, E.A. Dymov** **50**
Implementation of the principles of seismic isolation for effective seismic protection of oil and gas facilities

- T.A. Belash, I.V. Svitlik** **64**
Prospects for the use of structural systems of suspended buildings in seismic areas

- N.A. Afanas'ev** **73**
Comparison of the work of various variants of engineering protection structures and their combinations in a seismic area on the example of the object "Engineering landslide protection of the northern slope of the Psekhako ridge"

Photos on the cover of the issue – working moments of the conference

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9283-2021-5-8-21](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-8-21)

Сейсмический риск и ущерб

Оценка надежности многоэтажного здания в соответствии с принципами Еврокода

Лапин Владимир Алексеевич¹, Нурсафин Руслан Ерланович¹, Пак Эрик Федорович¹

¹АО «КазНИИСА». Алматы, Республика Казахстан

Аннотация: Предлагается способ определения надежности здания на основе применения основных принципов Еврокода. Надежность понимается как вероятность безотказной работы. Преобразование многомассовой системы в эквивалентную одномассовую нелинейную систему выполнено по методике нелинейного расчета Pushover (программный пакет MIDAS/Gen). Сейсмическое воздействие моделируется нестационарным случайным процессом, который получен из стационарного умножением на детерминированную огибающую. В качестве показателя надежности принят согласно EN 1990 индекс надежности β , который связан с величиной вероятности безотказной работы. За отказ принимается превышение величины предельно допустимых перемещений (перекоса) системы. Определение индекса надежности выполняется с помощью метода статистических испытаний (метод Монте-Карло). Приведен пример расчета 9-этажного жилого дома, ранее рассчитанного по спектральному методу. Поэтажные массы, перемещения и кривая несущей способности и её параметры берутся из результатов расчета здания, выполненного с применением вычислительным комплексом Midas gen. Результаты расчета показывают неудовлетворительную надежность здания по величине индекса β . Метод расчета может быть использован для расчета зданий по специальным техническим условиям (СТУ).

Ключевые слова: надежность, вероятность безотказной работы, индекс надежности, метод пушвер

Для цитирования: Лапин В.А., Нурсафин Р.Е., Пак Э.Ф. Оценка надежности многоэтажного здания в соответствии с принципами Еврокода // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2021. № 5. С. 8-21.

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-8-21](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-8-21)

Seismic risk and damage

Assessment of reliability of multi-storey building in accordance with Eurocode principles

V. Lapin¹, R. Nursafin¹, E. Pak¹

¹AO KazRDICA, Almaty, Republic of Kazakhstan

Abstract: A method for determining the reliability of a building based on the application of the basic principles of the Eurocode is proposed. Reliability is understood as the probability of

@ Лапин В.А., Нурсафин Р.Е., Пак Э.Ф., 2021

trouble-free operation. The transformation of a multi-mass system into an equivalent single-mass nonlinear system was performed using the Pushover nonlinear calculation method (MIDAS/Gen software package). The seismic impact is modeled by a non-stationary random process that is obtained from a stationary one by multiplying by a deterministic envelope. According to EN 1990, the reliability index β is adopted as an indicator of reliability, which is associated with the probability of failure-free operation. An excess of the maximum permissible displacements (misalignment) of the system is taken as a failure. The reliability index is determined using the statistical test method (Monte Carlo method). An example of the calculation of a 9-storey residential building, previously calculated by the spectral method, is given. The floor masses, displacements, and the load-bearing capacity curve and its parameters are taken from the results of the calculation of the building performed using the Midas gen computing complex. The calculation results show the unsatisfactory reliability of the building in terms of the index value. The calculation method can be used to calculate buildings according to special technical conditions (STU).

Keywords: reliability, probability of trouble-free operation, reliability index, Pushover method

For citation: Lapin V.A., Nursafin R.E., Pak E.F. Assessment of reliability of multi-storey building in accordance with Eurocode principles. *Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* = *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 8-21. (In Russian) DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-8-21](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-8-21)

1. Введение

Применение вероятностных методов в практике сейсмостойкого строительства имеет уже достаточно значительную историю [1-7]. Выполнялись расчеты разного рода каркасных зданий [3,4], различных сейсмоизолирующих систем [5] и т.д.

В [7] решены разнообразные задачи различной сложности. На основе вероятностного представления сейсмичности площадки строительства дается методика оценки надежности зданий различной конструкции при работе материала, как в упругой стадии, так и за пределом упругости. Рассмотрена задача для варианта системы, когда нелинейная силовая характеристика является случайной функцией. Изучаются вопросы распространения волн в статистически неоднородных средах. Целый раздел посвящен надежности систем с резервными элементами (системы сейсмоизоляции с выключающимися связями).

Если в условиях действия предыдущих нормативных документов в строительстве Республики Казахстан использование вероятностных методов носило единичный характер и, в основном, имело место для уникальных объектов, то в условиях действия новой нормативной базы на основе Еврокода открывается возможность их систематического применения.

Еврокоды в своей основе имеют вероятностный характер, формализуют понятие надежности и вводят понятия классов надежности [8,9]. Поэтому вероятностные расчеты в условиях действия Еврокода имеют возможность стать достаточно рутинными и весьма информативными.

2. Методы исследования

В данной работе предлагается практический метод оценки надежности здания в соответствии с Еврокодом. При этом рассматривается нелинейная расчетная модель

здания. Сейсмическое воздействие задается стационарным случайным процессом, который умножается на детерминированную огибающую.

2.1. Количественные оценки надежности

В EN 1990 определены 3 класса надежности - RC1, RC2 и RC3, которые могут быть связаны с тремя классами последствий – CC1, CC2 и CC3. В качестве показателя надежности приняты индексы надежности β (таблица 1, эквивалентная Таблице B2 EN 1990):

Таблица 1 – Рекомендуемые минимальные значения индекса надежности β (для критических предельных состояний)

Table 1 – Recommended minimum values of the reliability index β (for critical limit states)

Класс надежности	Минимальное значение индекса надежности β	
	Референтный период времени 1 год	Референтный период времени 50 лет
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Связь вероятности отказа P_f с индексом надежности β приведена в таблице 2, эквивалентной Таблице C1 EN 1990:

Таблица 2 – Зависимость между β и P_f

Table 2 – Relationship between β and P_f

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

В соответствии с таблицей 2 численной мерой надежности может служить индекс надежности β , зависящий от вероятности отказа P_f .

Наиболее универсальным методом вычисления вероятности P_f является метод статистических испытаний. Существующие вычислительные комплексы позволяют проводить детерминированные расчеты на воздействия в виде записей акселерограмм и сейсмограмм. Но при статистическом подходе необходимы расчеты на множество реализаций одного случайного процесса, моделирующего одно землетрясение. В этом случае по результатам множества расчетов можно получить статистические характеристики сейсмостойкости. Однако, возможность его практического применения ограничена ввиду значительных затрат по времени. Время детерминированного расчета играет ключевую роль при решении вероятностных задач методом статистических испытаний. При этом сложность и продолжительность расчета существенно возрастает в случае расчета в нелинейной постановке.

2.2. Расчетная модель здания

Для проведения статистического анализа целесообразно разработать методику, основанную на расчетной модели, которая при своей относительной простоте позволила бы качественно и количественно оценить сейсмостойкость здания. В данной работе используется подход, реализованный в Pushover EN [10]. Полное наименование метода, указываемое в зарубежной нормативной документации и научных публикациях – *Nonlinear Static Analysis Procedure (Pushover Analysis) - НСМ*.

Основной интегральной характеристикой колебания системы является частота колебания. В общем случае спектр частот может служить своеобразным динамическим идентификатором системы. Для линейных систем этот спектр постоянный, в случае нелинейных систем этот спектр переменный и зависит от амплитуды колебаний. Таким образом, в случае нелинейных систем можно говорить о «мгновенных частотах собственных колебаний». Сложность, связанную с этим обстоятельством, можно несколько упростить в случае приближенного подхода, основанного на рассмотрении одномассовой нелинейной системы вместо сложной многомассовой нелинейной системы.

В данной работе преобразование многомассовой нелинейной системы в эквивалентную одномассовую нелинейную систему выполнено по методике нелинейного расчета Pushover.

Таким образом, расчетная модель представлена одномассовой нелинейной системой с эквивалентной массой и билинейной диаграммой деформирования. Затухание принято по гипотезе Фойгта с учетом дополнительного гистерезисного затухания [2].

Оценка надежности проводится методом статистических испытаний, воздействие моделируется нестационарным случайным процессом.

2.3. Расчетная модель сейсмического воздействия

Нестационарный случайный процесс представлен в виде произведения стационарного случайного процесса на некоторую детерминированную функцию времени, зависящую от интегральных признаков сейсмического воздействия [2].

Воздействие моделируется случайным процессом в виде ансамбля реализаций, генерируемых в рамках корреляционной теории. При условии стационарности и эргодичности случайного процесса корреляционная функция имеет вид [1,2]:

$$K(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta\tau,$$

где $\alpha = 6 \div 8 \text{ с}^{-1}$, $\beta = 14 \div 20 \text{ с}^{-1}$

Алгоритм генерации реализаций искусственных землетрясений с заданной корреляционной функцией основан на прохождении «белого шума» через формирующий фильтр в виде обыкновенного линейного дифференциального уравнения второго порядка [11].

Параметры корреляционной функции для генерации реализаций определяются путем аппроксимации корреляционной функции записи акселерограммы землетрясения с региональными характеристиками.

2.4. Определение надежности

Надежность системы определяется как вероятность не наступления отказа. За отказ принимается превышение величины предельно допустимых перемещений системы.

Для реализации статистического анализа разработано приложение на языке Matlab. Входными данными являются: поэтажные массы и поэтажные перемещения исходной многомассовой системы, нелинейная диаграмма деформирования многомассовой системы (кривая несущей способности), предельно допустимые перемещения и запись акселерограммы, которая является исходной для генерации ансамбля реализаций.

В данной работе поэтажные массы, перемещения и кривая несущей способности и её параметры берутся из результатов расчета здания, выполненного вычислительным комплексом Midas gen. На первом этапе программа статистического анализа по исходным данным вычисляет эквивалентную массу и билинейную диаграмму деформирования расчетной одномассовой системы, а также корреляционную функцию ансамбля реализаций. Затем генерируются реализации воздействия и происходит интегрирование дифференциального уравнения колебаний. В случае превышения предельно допустимых перемещений фиксируется отказ системы. Процесс интегрирования завершается при достижении заданной точности вычисления вероятности отказа. *Критерием для оценки надежности здания является индекс надежности β* . По таблице 1 определяется индекс надежности β и устанавливается класс надежности здания RC.

3. Пример расчета

В качестве примера рассмотрим 9-этажное здание, рассчитанное на сейсмические воздействия по спектральному методу и по нелинейному методу Pushover. На рис.1 приведена исходная расчетная схема здания, а на рис.2 – поэтажные массы при расчете на сейсмические воздействия по спектральному методу, на рис.3 – поэтажные перемещения (интерфейс программного комплекса MIDAS/Gen).

Далее выполняется подготовительная работа для расчетов по методу Pushover (рис.4-6). На рис.6 по оси абсцисс – метры, по оси ординат – тонны.

На рис. 7 приведена акселерограмма землетрясения NORTHERN CALIFORNIA 3 октября 1941. (магнитуда $M=6.4$, гипоцентральное расстояние $R=50$ км, величина пика ускорения -118.6 см/с², место регистрации населенный пункт FERNDALE, Калифорния. На рис.8 приведена корреляционная функция акселерограммы (исходная и соответствующая аппроксимация).

С учетом референтного периода повторяемости $T_{NCR}=475$ лет вероятность отказа (рис.9)

$$P_f=0.3*1/475 = 6.32 *10^{-4} .$$

По таблице 1 индекс надежности $\beta=3.28$. При классе надежности рассматриваемого здания RC2, требуемое значение индекса по таблице 2 равно 3.8. Таким образом, надежность здания недостаточна.

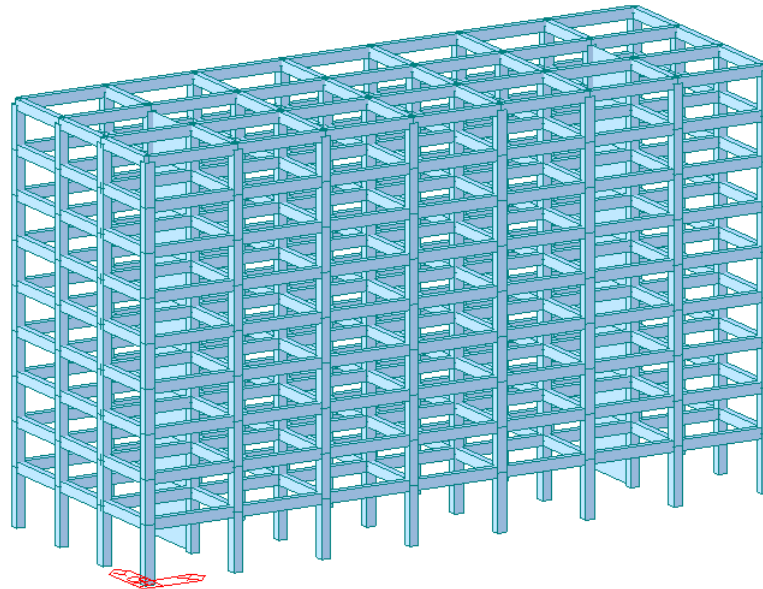


Рисунок 1 – Расчетная схема 9-этажного здания

Figure 1 – Design scheme of a 9-storey building

Story	Level (m)	Translational Mass		Rotational Mass (tonf/g*m ²)	Center of Mass	
		X-DIR (tonf/g)	Y-DIR (tonf/g)		X-Coord (m)	Y-Coord (m)
Use Ground Level : OFF						
Consider Mass under Ground Level : ON						
Roof	34.1376	137.62199706	137.62199706	44989.6138	27.7368	10.0584
9F	30.4800	149.54697456	149.54697456	49640.7027	27.7368	10.0584
8F	26.8224	149.54697456	149.54697456	49640.7027	27.7368	10.0584
7F	23.1648	149.54697456	149.54697456	49640.7027	27.7368	10.0584
6F	19.5072	149.54697456	149.54697456	49640.7027	27.7368	10.0584
5F	15.8496	149.54697456	149.54697456	49640.7027	27.7368	10.0584
4F	12.1920	149.54697456	149.54697456	49640.7027	27.7368	10.0584
3F	8.5344	149.54697456	149.54697456	49640.7027	27.7368	10.0584
2F	4.8768	153.52196706	153.52196706	51191.0656	27.7368	10.0584
1F	0.0000	0.00000000	0.00000000	0.0000	0.0000	0.0000
	Total	1337.9727860	1337.9727860			

Рисунок 2 – Поэтажные массы при расчете на сейсмические воздействия по спектральному методу

Figure 2 – Floor masses when calculating for seismic effects using the spectral method

	Load Case	Node	Story	Level (m)	Story Height (m)	Maximum Displacement (m)	Average Displacement (m)	Maximum / Average
▶	RX(RS)	289	Roof	34.14	0.00	0.0577	0.0577	1.0000
	RX(RS)	257	9F	30.48	3.66	0.0559	0.0559	1.0000
	RX(RS)	225	8F	26.82	3.66	0.0528	0.0528	1.0000
	RX(RS)	193	7F	23.16	3.66	0.0484	0.0484	1.0000
	RX(RS)	161	6F	19.51	3.66	0.0428	0.0428	1.0000
	RX(RS)	129	5F	15.85	3.66	0.0361	0.0361	1.0000
	RX(RS)	97	4F	12.19	3.66	0.0285	0.0285	1.0000
	RX(RS)	65	3F	8.53	3.66	0.0200	0.0200	1.0000
	RX(RS)	33	2F	4.88	3.66	0.0110	0.0110	1.0000
	RX(RS)	0	1F	0.00	4.88	0.0000	0.0000	0.0000

Рисунок 3 – Поэтажные перемещения при расчете на сейсмические воздействия по спектральному методу

Figure 3 – Floor-to-floor displacements when calculating seismic effects using the spectral method

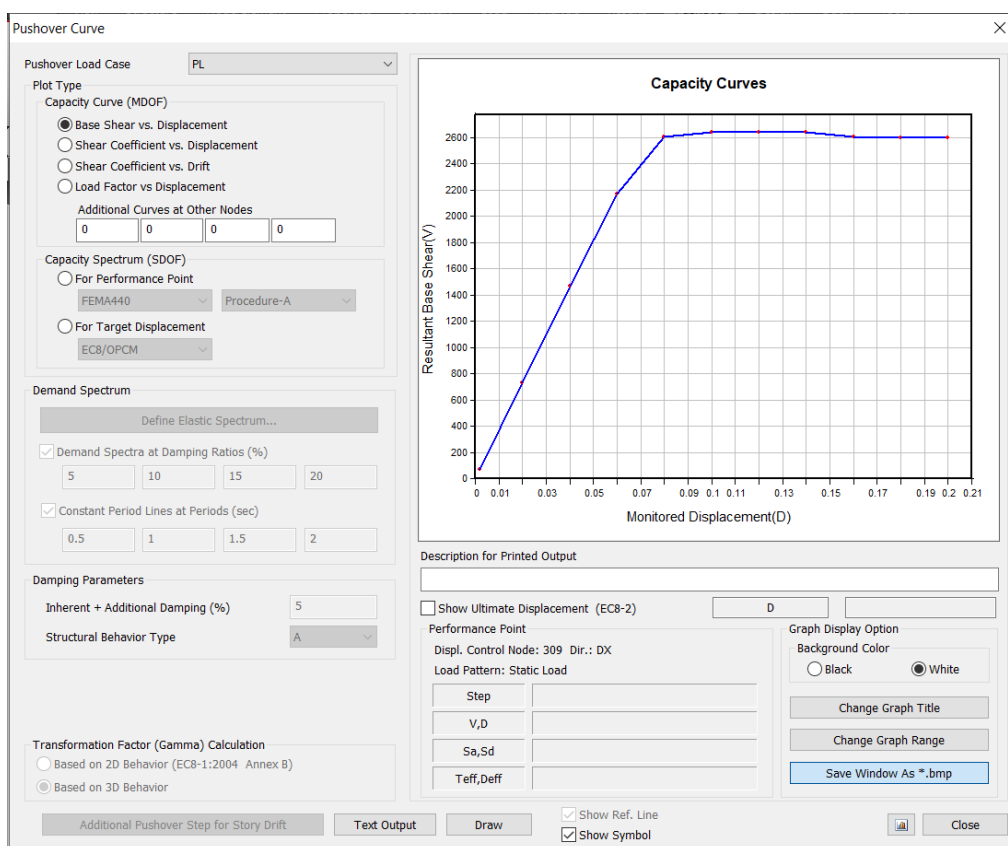


Рисунок 4 – Кривая несущей способности при расчете Pushover

Figure 4 – Load-bearing capacity curve when calculating Pushover

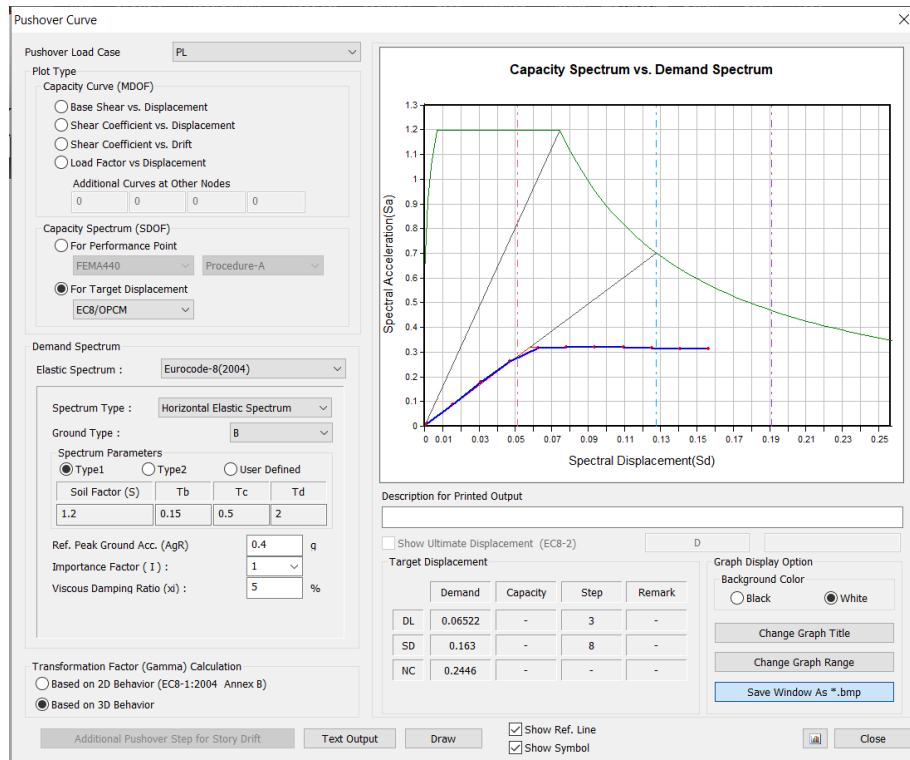


Рисунок 5 – Кривая Pushover. SD – целевое перемещение; NC – предельное перемещение

Figure 5 – Pushover curve. SD – target movement; NC – limit displacement

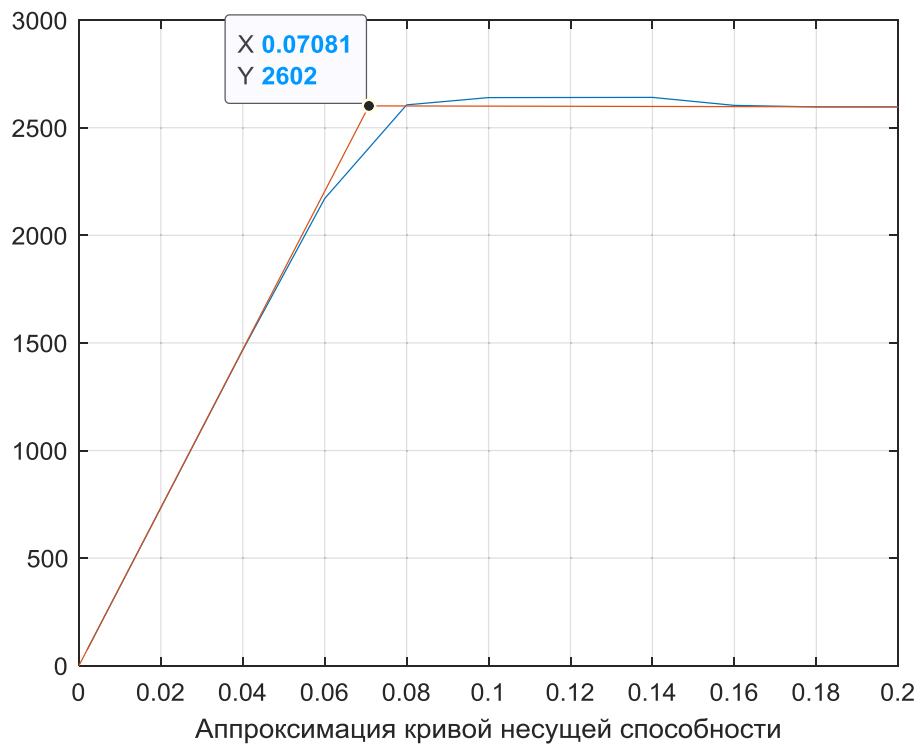


Рисунок 6 – Билинейная диаграмма деформирования

Figure 6 – Bilinear deformation diagram

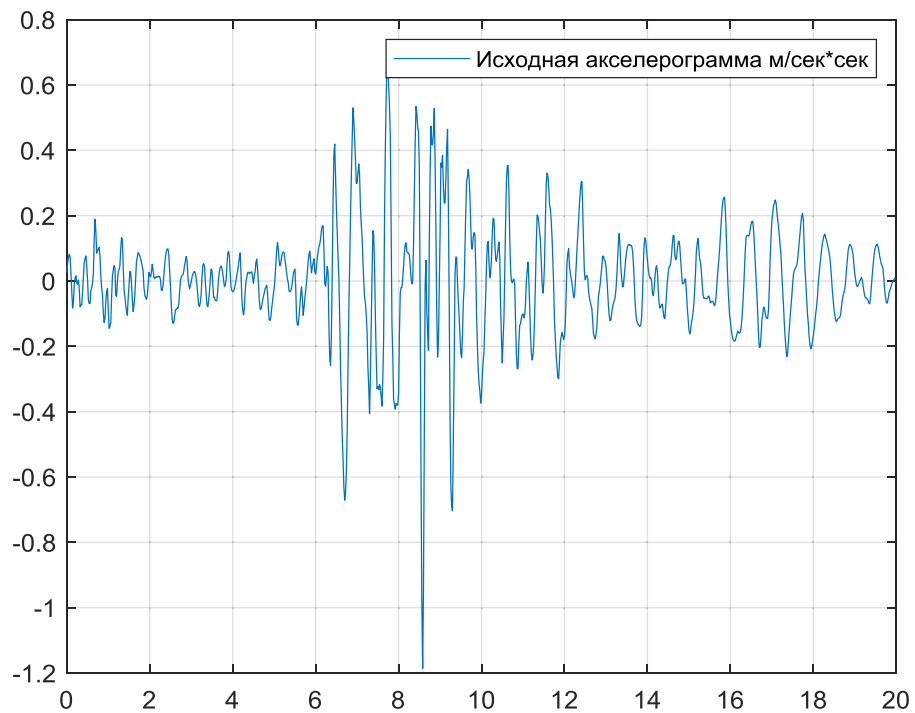


Рисунок 7 – Исходная акселерограмма

Figure 7 – Initial accelerogram

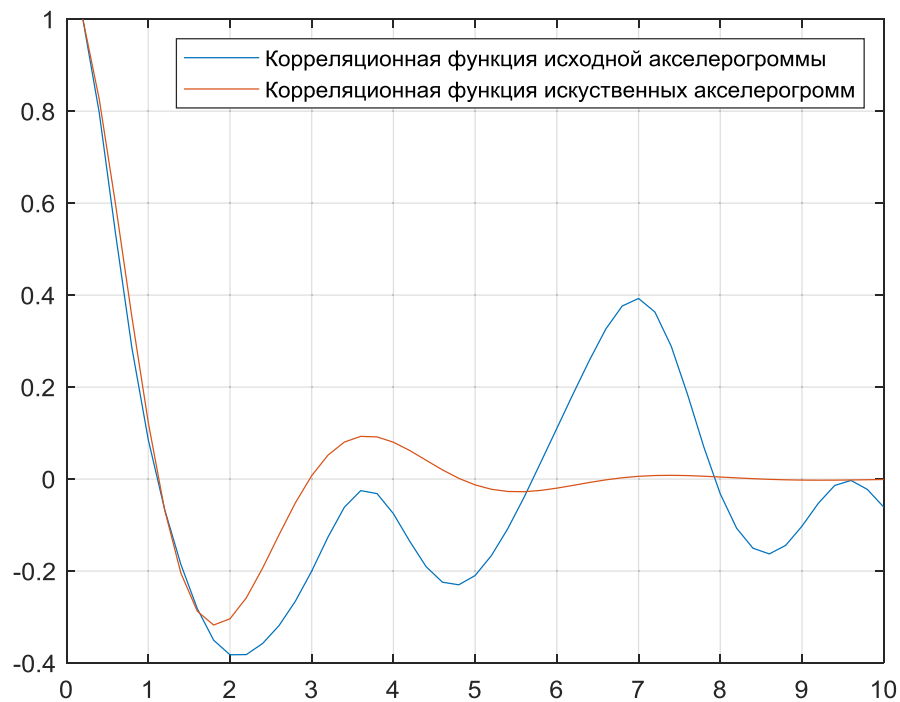


Рисунок 8 – Построение корреляционной функции для генерации ансамбля реализаций искусственного землетрясения

Figure 8 – Construction of a correlation function for generating an ensemble of realizations of an artificial earthquake

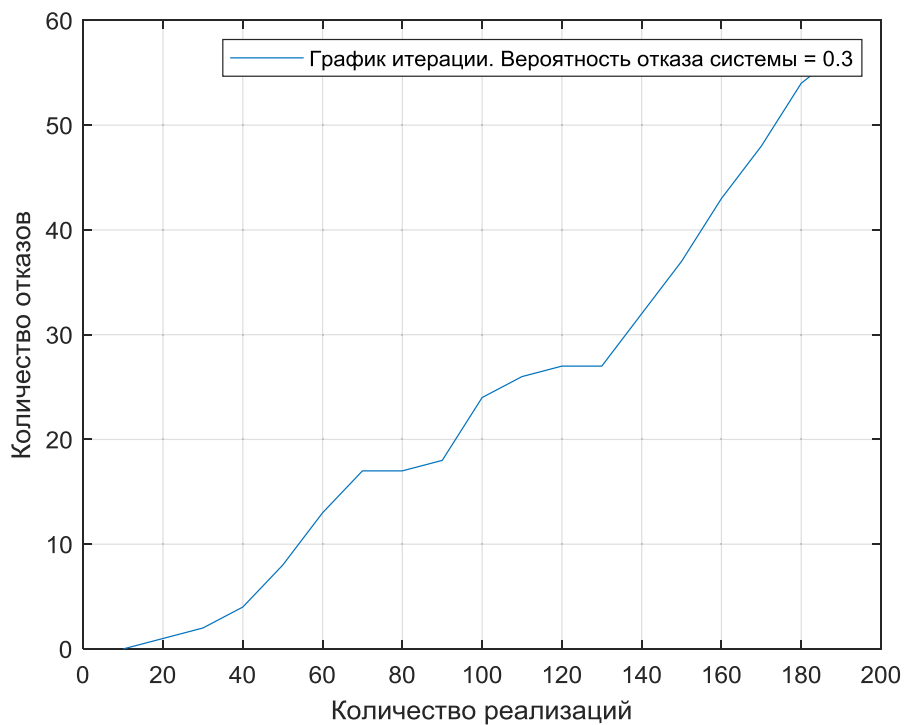


Рисунок 9 – График итерации для нахождения вероятности отказа системы.

Figure 9 – An iteration graph for finding the probability of a system failure.

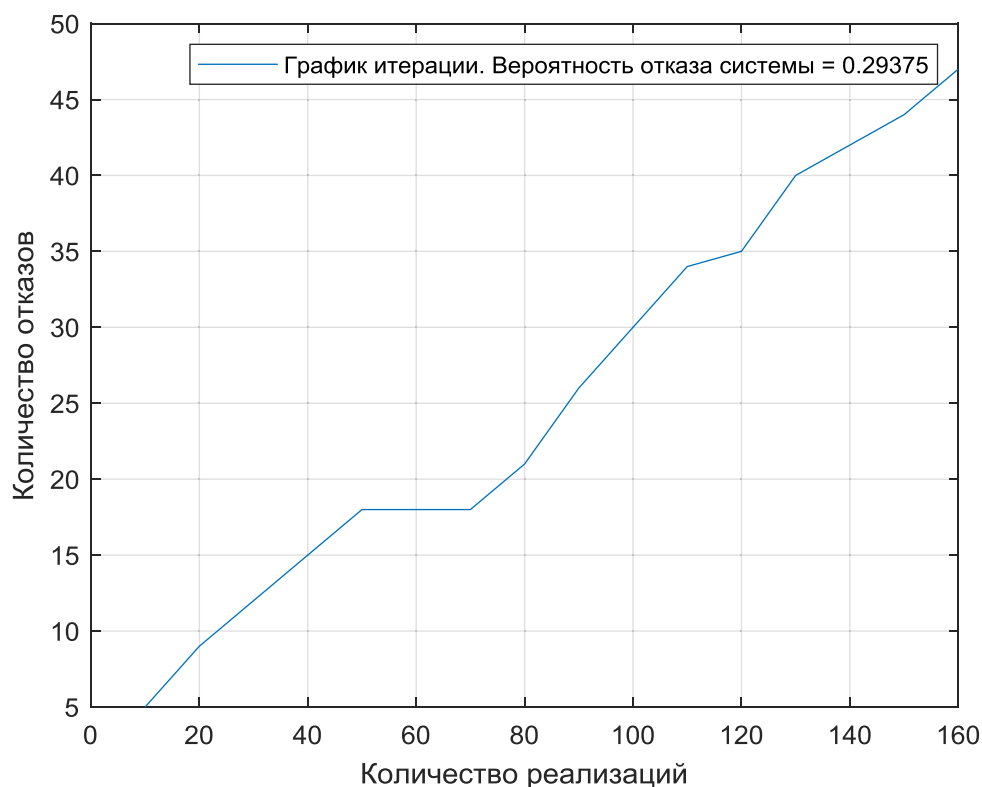


Рисунок 10 – Величины надежности

Figure 10 – Reliability values

4. Обсуждение результатов

Данный пример демонстрирует возможности метода расчета зданий на надежность с применением возможностей вычислительного комплекса MIDAS/Gen, принципов Еврокода и подходов метода Пушвер, а также учета повторяемости землетрясений, нормируемых Картами сейсмического зонирования Республики Казахстан.

Показано, что нормативные документы на основе Еврокода содержат всю необходимую информацию для расчета величин надежности, которые являются в конечном счете и показателями сейсмостойкости здания и его качества.

Величина надежности по расчету в данном случае базируется на простых предпосылках о модели воздействия.

Безусловно, что практическая реализация данного метода должна основываться на учете регионального характера и полиэкстремальности сейсмического воздействия.

Следует отметить, что Пушвер метод интегрирован во многие расчетные комплексы, которые также могут применяться для реализации указанного метода, SAP2000, ETABS, FESPA, SOFISTIK, SCADA PRO, INDYAS, DRAIN-2DX, SeismoStuct, ADAPTIC, RUAUMOKO 3D.

Область применения данного метода это расчеты зданий для составления Специальных Технических Условий, а также расчеты уникальных зданий и сооружений. В конечном счёте, главной задачей является проектирование и строительство надежных зданий, эксплуатация которых безопасна для населения.

Представляются интересными предложения по уровням надежности высотных зданий [12], которые являются ответственными сооружениями. Указанные там величины

нормируемой надежности могут быть использованы как критерии сейсмостойкости высотных зданий.

5. Выводы

1. Разработана методика расчета надежности зданий, основанная на предварительных нормативных расчетах здания с использованием вычислительного комплекса Midas gen, последующего использования Пушвер анализа и цифрового моделирования сейсмического воздействия. Учитываются результаты Карт сейсмического зонирования Республики Казахстан.

2. Область применения метода расчетов зданий и сооружений, проектируемых на основе Специальных Технических Условий - высотные, протяженные здания, объекты, работающие в сложных условиях (ТЭЦ, ГЭС), объекты вблизи тектонических разломов и т.д.

Список литературы

1. Барштейн М.Ф. Приложение вероятностных методов к расчету сооружений на сейсмические воздействия // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1960. № 2. С.6-14.
2. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. М.: Стройиздат. 1961. 202 с.
3. Жунусов Т.Ж., Пак Э.Ф., Лапин В.А. Сейсмостойкость многоэтажных каркасных промзданий, моделируемых нелинейными нестационарными системами. «Исследования сейсмостойкости сооружений и конструкций». 1986, вып.14-15(24-25). С.3-9.
4. Пак Э.Ф., Лапин В.А. Колебания промышленных зданий как нелинейных нестационарных систем при сейсмических воздействиях. М.: Наука. «Расчет и проектирование зданий для сейсмоопасных районов». 1988, с.115-118.
5. Кириков Б.А. Статистический метод расчета конструкций на сейсмические воздействия как нелинейных систем // *Сейсмостойкое строительство*. 1978. Вып.4.С.4-11.
6. Lapin V. A., Yerzhanov S. E., Aldakhov Y. S. (2020) Statistical modeling of a seismic isolation object under random seismic exposure *Journal of Physics: Conference Series* 1425 012006 doi:10.1088/1742-6596/1425/1/012006
7. Напетваридзе Ш.Г., Кириков Б.А., Чачава Т.Н., Абакаров А.Д., Бурчуладзе Т.П., Жоржوليани Г.В., Кучухидзе З.А., Реквава П.А., Тимченко И.Э., Уклеба Д.К. Вероятностные оценки сейсмических нагрузок на сооружения. М.: Наука. 1987.120 с.
8. Gulvanessian H, Calgaro J.-A. AND Holicky M. *Designers' Guide to EN 1990 Eurocode: Basis of structural design*. Published 2002, 978 0 7277 3011 4, pp. 263
9. Основы строительного проектирования. Агентство Республики Казахстан по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства. 2011. ISBN 978-601-7330-43-9. 96 с.
10. Соснин А.В. Особенности оценки дефицита сейсмостойкости железобетонных каркасных зданий методом нелинейного статистического анализа в SAP2000 // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2016. Т.16. №1. С. 12–19. DOI: 10.14529/build160102
11. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – Изд-во «Советское радио», Москва, 1971.
12. Жемчугов-Гитман Д.М., Мозжухин Л.В., Уздин А.М. К вопросу задания уровня расчетного воздействия и надежности высотного строительства // *Сейсмостойкое*

строительство. Безопасность сооружений».2021.№1.С.43-56. DOI:/10.37153/2618-9283-2021-1-43-56.

References

1. Barshtejn M.F. Prilozhenie veroyatnostnyh metodov k raschetu sooruzhenij na sejsmicheskie vozdejstviya. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. 1960, no. 2, pp. 6-14. (In Russian)
2. Bolotin V.V. Statisticheskie metody v stroitel'noj mekhanike. M.: Strojizdat, 1961.202 p. (In Russian)
3. Zhunusov T.Zh., Pak E.F., Lapin V.A. Sejsmostojkost' mnogoetazhnyh karkasnyh promzdaniy, modeliruemyh nelinejnymi nestacionarnymi sistemami. «Issledovaniya sejsmostojkosti sooruzhenij i konstrukcij», 1986, vyp.14-15(24-25), pp.3-9. (In Russian)
4. Pak E.F., Lapin V.A. Kolebaniya promyshlennyh zdaniy kak nelinejnyh nestacionarnykh sistem pri sejsmicheskikh vozdejstviyah. M.: Nauka, «Расчет и проектирование зданий для сейсмоопасных районов». 1988, pp.115-118. (In Russian)
5. Kirikov B.A. Statisticheskij metod rascheta konstrukcij na sejsmicheskie vozdejstviya kak nelinejnykh sistem. Sejsmostojkoe stroitel'stvo. 1978, vyp.4, pp.4-11. (In Russian)
6. Lapin V. A., Yerzhanov S. E., Aldakhov Y. S. (2020) Statistical modeling of a seismic isolation object under random seismic exposure Journal of Physics: Conference Series 1425 012006 doi:10.1088/1742-6596/1425/1/012006
7. Napetvaridze Sh.G., Kirikov B.A., Chachava T.N., Abakarov A.D., Burchuladze T.P., Zhorzholiani G.V., Kuchuhidze Z.A., Rekvava P.A., Timchenko I.E., Ukleba D.K. Veroyatnostnye ocenki sejsmicheskikh nagruzok na sooruzheniya. M.: Nauka. 1987, 120 p. (In Russian)
8. Gulvanessian H, Calgaro J.-A. AND Holicky M. Designers' Guide to EN 1990 Eurocode: Basis of structural design. Published 2002, 978 0 7277 3011 4, p. 263.
9. Osnovy stroitel'nogo proektirovaniya. Agentstvo Respubliki Kazahstan po delam stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva, 2011 god. ISBN 978-601-7330-43-9. 96 p. (In Russian)
10. Sosnin A.V. Osobennosti ocenki deficita sejsmostojkosti zhelezobetonnyh karkasnyh zdaniy metodom nelinejnogo statisticheskogo analiza v SAP2000. Vestnik YuUrGU. Seriya «Stroitel'stvo i arhitektura». 2016, vol. 16, no. 1, pp. 12–19. DOI: 10.14529/build160102 (In Russian)
11. Bykov V.V. Cifrovoe modelirovanie v statisticheskoy radiotekhnike. Izd-vo «Sovetskoe radio». Moskva, 1971. (In Russian)
12. Zhemchugov-Gitman D.M., Mozzhuhin L.V., Uzdin A.M. K voprosu zadaniya urovnya raschetnogo vozdejstviya i nadezhnosti vysotnogo stroitel'stva. Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij. 2021, no.1, pp.43-56. DOI:/10.37153/2618-9283-2021-1-43-56. (In Russian)

Сведения об авторах / Information about the authors

Лапин Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, Директор Центра научных исследований строительной отрасли, ученый секретарь, член-корреспондент НИА РК и МИА, академик Казахской академии архитектуры и строительных наук, АО «КазНИИСА». Алматы, Республика Казахстан
lapin_1956@list.ru

Vladimir A. Lapin, Candidate of Technical Sciences, Director of the Center for Scientific Research of the Construction Industry, Scientific Secretary, Corresponding member of the NIA RK and MIA, academician of the Kazakh Academy of Architecture and Construction Sciences, KazRDICA JSC. Almaty, Republic of Kazakhstan
lapin_1956@list.ru

Нурсафин Руслан Ерланович, Заведующий отделом моделирования и расчета строительных конструкций, АО «КазНИИСА». Алматы, Республика Казахстан,
rnursafin@kazniisa.kz

Ruslan Y. Nursafin, Head of the Department of Modeling and Calculation of Building Structures, KazNIISA JSC. Almaty, Republic of Kazakhstan
rnursafin@kazniisa.kz

Пак Эрик Федорович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «КазНИИСА». Алматы, Республика Казахстан
park_er@mail.ru

Erik F. Pak, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, KazNIISA JSC. Almaty, Republic of Kazakhstan
park_er@mail.ru

УДК 624.072

DOI [10.37153/2618-9283-2021-5-22-35](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-22-35)

Техническое регулирование и развитие норм проектирования

О необходимости изменения расчетных схем на сейсмостойкость в строительных нормах и правилах (СНиП)

Оганесян С. М.¹, Карапетян Дж. К.², Геодакян Э. Г.³, Саакян Б. В.⁴

^{1,2,3,4} ИГИС НАН РА. Гюмри, Республика Армения

Аннотация: При кинематическом возбуждении консольного стержня показано, что изгибно-сдвиговые колебания начинаются со свободного конца стержня. При этом в стержне возникают внутренние объемные силы, которые противодействуют $1/2f(x,t)$ внешней силе, а на свободном конце стержня возникает связанная пара $F(l,t)$ и $M(l,t)$. Эта связанная пара является истинной причиной изгибно-сдвиговых колебаний. Вторая часть силы $f(x,t)$ идет на создание чисто сдвиговых колебаний, которые направлены противоположно $1/2f(x,t)$, т.е. $-1/2f(x,t)$. В процессе создания чисто сдвиговых колебаний принимают участие две силы, внутренних трения и импульса, которые направлены для задачи 1 противоположно, а для задачи 2 и 3 в нижней части для $x < l/2$ они имеют одинаковые направления, а для $l/2 < x < l$ – противоположное.

Из разработанной новой гравитационно-вихревой теории сейсмостойкости следует, что в расчетных схемах для одномерных моделей имеется четырехкратный резерв (запас) по оценке сил и моментов в сечениях однородного стержня. Эти возможности позволяют повысить ускорения на картах сейсмического районирования как минимум в два раза и привести в соответствие ускорения, наблюдаемые при сильных и разрушительных землетрясениях, с максимальными ускорениями используемыми в СНиП.

Ключевые слова: сейсмостойкость, новые расчетные схемы, изгибная волна, силы инерции, внутреннее трение

Для цитирования: Оганесян С. М., Карапетян Дж. К., Геодакян Э. Г., Саакян Б. В. О необходимости изменения расчетных схем на сейсмостойкость в строительных нормах и правилах (СНиП) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С. 22-35. DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-22-35](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-22-35)

Technical regulation and design standards development

On the need to change the calculation schemes for seismic resistance in building codes and rules (BRandR)

Hovhannisyan S. M.¹, Karapetyan J.K.², Geodakyan E.G.³, Sahakyan B.V.⁴

^{1,2,3,4} IGES NAS RA. Gyumri, Republic of Armenia

Abstract: With the kinematic excitation of a cantilever rod, it has been shown that flexural-shear oscillations begin at the free end of the rod. In this case, internal bulk forces arise in the rod, which oppose $1/2 f(x, t)$ to external force, and at the free end of the rod, an associated pair $F(l, t)$

@ Оганесян С. М., Карапетян Дж. К., Геодакян Э. Г., Саакян Б. В., 2021

and $M(l, t)$ arise. This coupled pair is the true cause of flexural-shear vibrations. The second part of the force $f(x, t)$ goes to create purely shear vibrations.

From the developed new gravitational-vortex theory of seismic stability, it follows that in the design schemes for one-dimensional models there is a fourfold reserve (reserve) for the assessment of forces and moments in the sections of a homogeneous rod. These capabilities make it possible to increase the acceleration on the seismic zoning maps at least twice and to bring the accelerations observed during strong and destructive earthquakes into line with the accelerations used in BRandR.

Keywords: seismic resistance, new payment schemes, bending wave, inertial forces, internal friction

For citation: Hovhannisyan S. M., Karapetyan J.K., Geodakyan E.G., Sahakyan B.V. On the need to change the calculation schemes for seismic resistance in building codes and rules (BRandR). *Seismostoi koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 22-35 (In Russian) .

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-22-35](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-22-35)

Введение

Сильные и разрушительные землетрясения, как это не печально, являются одним из естественных экспериментов, в которых проверяется точность теории сейсмостойкости и могут быть получены новые данные о поведении зданий и сооружений.

Макросейсмические изучения последствий разрушительных землетрясений [2,4,5,28,29] (Мексиканского 19 сентября 1985 г., Спитакского 7 декабря 1988 г., Нортриджского землетрясения 17 января 1994 г., Японского 17 января 1995 г. (особенно в городе Кобе), Тайваньского землетрясения 21 сентября 1999 г. и Великого японского землетрясения 11 марта 2011 г.) показывают, что возникают множество необъясненных форм разрушения зданий и сооружений и иных аномальных явлений, которые не укладываются в рамки известных теорий сейсмостойкости. Это обвал около 40 9-этажных зданий серии 111 в городе Гюмри (Ленинакан) прямо на фундамент [14]. Возникновение в г. Кобе аномального раздробления высокопрочного бетона сразу по всей высоте колонны одного этажа в середине здания [28,29]. Это приводило к тому, что колонны всего среднего этажа полностью рассыпались, их арматура под тяжестью верхних этажей спрессовывалась, а один или два этажа зданий как бы исчезали. Эти явления названы эффектами среза «короткой колонны» или «схлопывания» этажей. Получение повреждений и разрушение посередине высоты массивных памятников участникам Великой Отечественной войны в различных населенных пунктах Республики Армения [25]. Такие разрушения и срезы колонн и вращения по срезу наблюдались в г. Ленинакане во время землетрясения 22 октября 1926 года [2]. Возникновение в толстых железобетонных колоннах эстакад с относительно низкой вертикальной нагрузкой «пластических» срезов, охватывающих все ее сечение. Такие аномальные срезы опор эстакад часто возникали в Лос-Анджелесе в 1994 г., в городе Кобе в 1995 г. и во время Тайваньского землетрясения 1999 г. [28,29].

Проведенные исследования показали [1,4,6,14,25,27], что одной из основных проблем инженерной сейсмологии, сейсмического районирования (СР) и сейсмического микрорайонирования (СМР), сейсмостойкого строительства остается вопрос повышения на картах СР и СМР исходных величин сейсмических ускорений (ВСУ) до $0.7 \div 0.8 \div 1.0g$ (g – ускорение свободного падения) для средних грунтов. Увеличение ВСУ для средних грунтов до $0.7 \div 0.8 \div 1.0g$ на картах СР и СМР приводит к увеличению в два раза инерционных сейсмических сил, действующих при землетрясении, на здания и

сооружения. Как следствие этого при проектировании повышаются расчетные силы, что, в конечном счете, приводит к резкому повышению стоимости возводимых зданий и сооружений.

Поэтому возникает необходимость разработки таких расчетных схем колебаний зданий и сооружений (новой теории сейсмостойкости), в которых учитываются огромные величины сейсмических ускорений, наблюдаемые в действительности. Впервые этот вопрос поднимается в последней статье акад. А.Г. Назарова [11].

По мнению авторов это возможно по трем существенно различным направлениям:

1) переход от одномерных к двух- или трехмерным моделям сооружений; 2) учет влияний нелинейности, вертикальных сил, кручений, упруго-пластического деформирования; 3) нахождение неизвестных резервов в одномерных моделях.

Наибольший интерес для авторов представляет 3-е направление, исходя из возможностей новой модели массы (НММ) [14].

Для построения новой теории сейсмостойкости (НТС) и объяснения эффекта среза «короткой колонны» важное значение имеют результаты, полученные в работах [12,16,19,20] при колебаниях однородного стержня постоянного сечения длины l со следующими граничными условиями (рис.1): задача 1 – консольный стержень; задача 2 – оба конца стержня жестко защемлены; задача 3 – один конец жестко защемлен, а другой удовлетворяет условию

$$\frac{\partial U(l,t)}{\partial x} = 0 \quad (\varphi(l,t)=0). \quad (1)$$

В работе [17] в результате введения понятий мгновенного центра вращения (МЦВ), мгновенного момента инерции (ММИ) и приведенных длин, удалось впервые произвести декомпозицию постановку задачи о распространения упругой волны изгиба на две подзадачи и снизить порядок решаемых уравнений с четвертого до второго.

Полученные системы уравнений для подзадач I и II существенно отличаются от известных уравнений изгибных колебаний С.П. Тимошенко и Бернулли-Эйлера [13].

Для начала подробно рассмотрим задачу 1, потому что она имеет ключевую роль для статьи. Задачи 2 и 3 в силу симметрии смещения $U_1(x,t)$ относительно точки перегиба 2 сводятся к задаче 1 (см. рис. 4а,б) [22,23]. В работе [17] даны постановки задачи о распространении волны чистого изгиба и изгиба при свободных колебаниях однородного консольного стержня постоянного поперечного сечения.

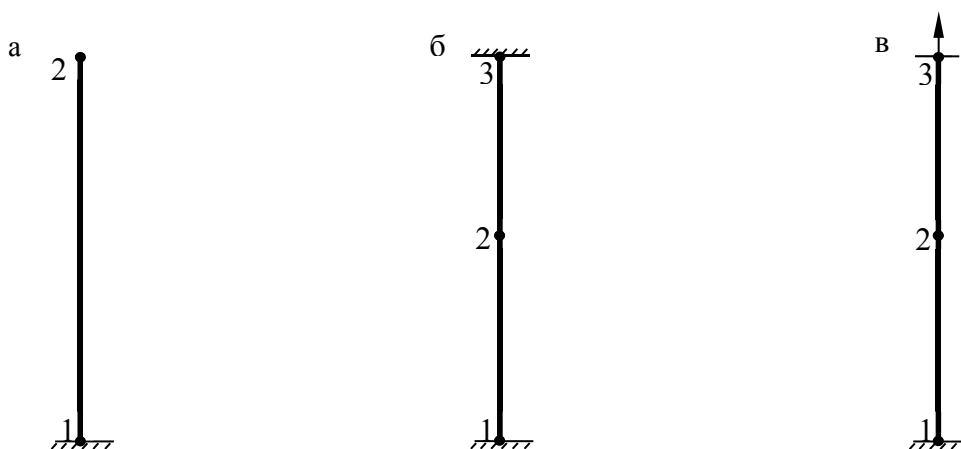


Рисунок 1 – Задача 1 – а, задача 2 – б, задача 3 – в

Figure 1 – Task 1-a, task 2-b, task 3-c

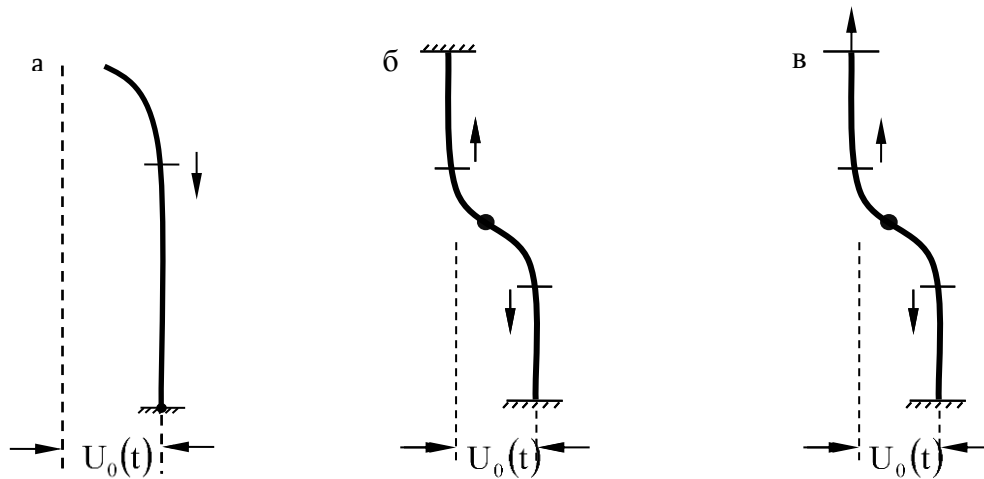


Рисунок 2 – Расчетные схемы изгибно-сдвиговых и чисто изгибных колебаний для задач 1-3

Figure 2 – Calculation schemes of flexural-shear and simple flexural variations for 1-3 tasks

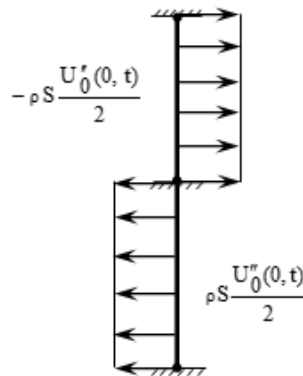


Рисунок 3 – Расчетные схемы чисто сдвиговых колебаний для задачи 2 и 3

Figure 3 – Calculation schemes of simple shear variations for the tasks 2 and 3

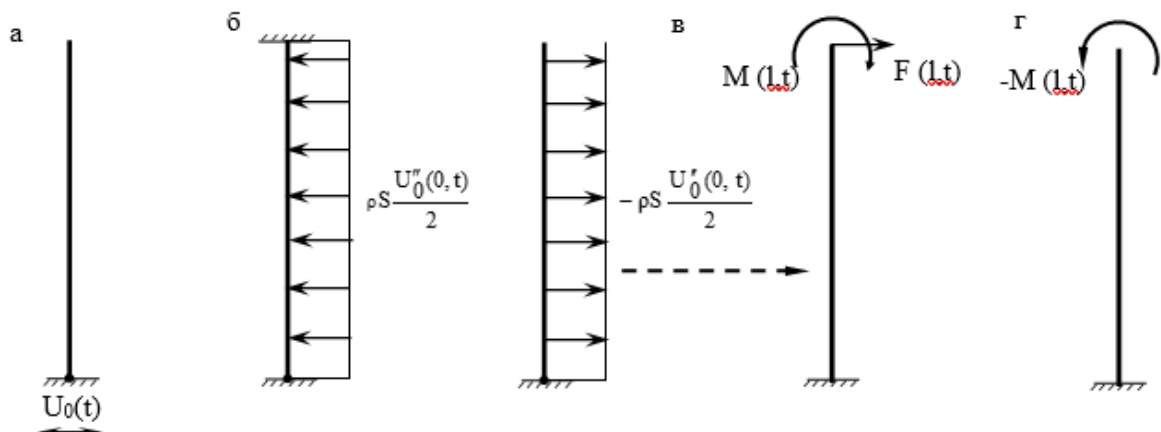


Рисунок 4 – Расчетная схема чисто сдвиговых (б), изгибных (в) и чисто изгибных (г) колебаний для задачи 1

Figure 4 – Calculation scheme of simple shear (b), flexural(c) and simple flexural (d) variations for task 1

2. Для теории сейсмостойкости важное значение имеет решение задачи о вынужденных колебаниях однородного консольного стержня на изгиб (ВКОКСИ).

При рассмотрении задачи о вынужденных колебаниях однородного консольного стержня на изгиб оказалось [13], что при силовом внешнем воздействии в виде распределенной силы $f(x, t)$ истинной причиной изгибных колебаний является ее обобщенная частная производная по переменной x , $f'_x(x, t)$.

Так как в момент времени $t = 0_{+0}$ фронт изгибной волны начинается со свободного конца стержня, то остается открытым вопрос – какие силы компенсируют внешнюю распределенную силу $f(x, t) = f(t)$.

При этом в стержне возникают «внутренние» объемные силы $q(x, t)$, которые обязательно необходимо учитывать при уточненной формулировке постановки задачи о свободных и вынужденных колебаниях консольного стержня на изгиб.

Далее в работах [12,17] показано, что решения задачи ВКОКСИ подразделяется на стационарную и волновую подзадачи, которые принимают соответственно следующие виды:

$$q(x, t) - kGS \frac{\partial^2 \bar{U}_2}{\partial x^2} = f(x, t) \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho S \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial t^2} - kGS \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial x^2} = f_x(t) = -\frac{1}{2} f(t) \delta(x - l) \quad (3) \\ \text{при нулевых начальных и граничных условиях} \end{array} \right.$$

$$\phi_2(0, t) = \frac{\partial \phi_2(l, t)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\phi_2(x, 0) = \frac{\partial \phi_2(x, 0)}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} u \\ \frac{\partial U_2}{\partial x} = \bar{\phi}_2(x, t), \quad (6) \end{array} \right\}$$

$$U_2(0, t) = 0, \quad (7)$$

где (\cdot) – дельта функция Дирака,
 $\bar{\phi}_2(x, t)$ – решение задачи (6) – (7),
 ρ - плотность стержня.

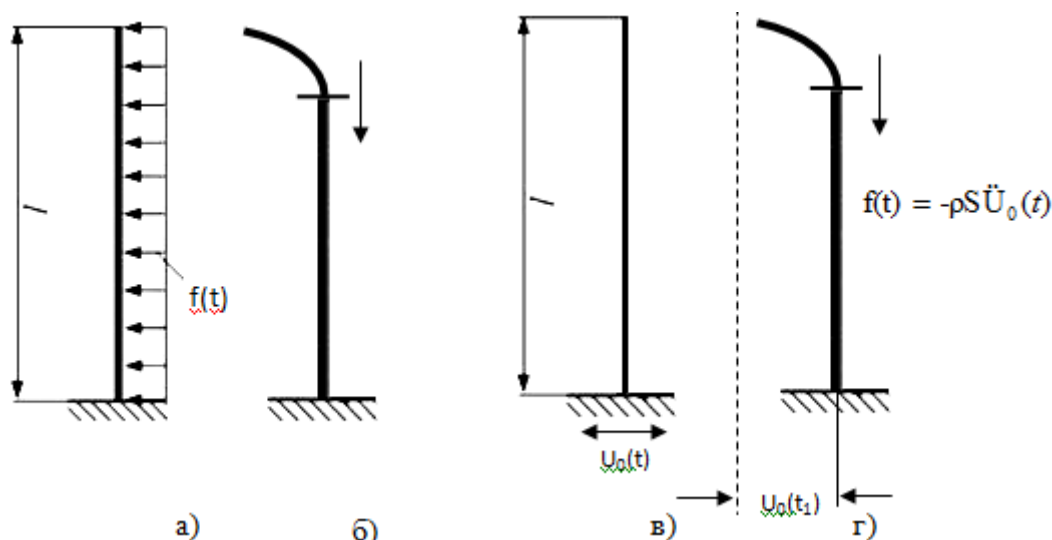


Рисунок 5 – Фрагменты первой фазы изгибных колебаний при различных источниках возбуждений

Figure 5 – Fragments of the first phase of bending variations at various sources of excitation

Полученные решения, приведенные на рис.4, показывают, что волновая подзадача I является на самом деле динамико-кинематическим описанием первой части процесса изгибных колебаний при силовом воздействии $f(x,t)$. Она подготавливает процедуру определения перерезывающей силы $Q(x,t)$ по формуле (2) по всему сечению стержня, которая используется в подзадаче II фактически как «внешнее» воздействие, при нулевых начальных и граничных условиях.

В процессе разработки новой (гравитационно-вихревой) теории сейсмостойкости (НТС) [13,17], соответственно, новых расчетных схем, постепенно кристаллизовалась идея, что только новая модель массы (НММ) [14] недостаточна для его построения.

В работе [13] показано, что при колебании однородного консольного стержня длины l полное перемещение нейтральной линии $U(x,t)$ представимо в виде $U(x,t) = U_1(x,t) + U_2(x,t) + U_3(x,t)$, где $U_1(x,t)$ - чистый изгиб, $U_2(x,t)$ - изгибно-сдвиг, $U_3(x,t)$ - чистый сдвиг. В проведенных автором исследованиях показано [14,17], что полную физическую нагрузку при нахождении изгибно-сдвиговой составляющей $U_2(x,t)$ несет не волновое уравнение (3), а соответствующая ему система линейных дифференциальных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho S \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial x}, \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p}{\partial t} = kGS \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} - \frac{1}{2} f(x,t), \end{array} \right. \quad (9)$$

где φ - угол поворота сечение S , $p(x,t)$ - внутренний распределенный импульс.

Из уравнений (8)-(9) видно, что в консольном стержне (задача 1) при кинематическом возбуждении возникает внутренний распределенный объемный импульс

(количество движения) $p(x,t)$, производная $\frac{\partial p}{\partial t}$ который в равенстве (9) балансирует (противодействует) $\frac{1}{2}f(x,t)$ и одновременно связанный с ним внутренний распределенный момент $\frac{J}{S} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t \partial x}$. Выражение $\frac{J}{S} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t \partial x}$ получается из равенства (8) дифференцированием по переменной t и умножением слева и справа на величину $\frac{J}{S}$, т.е.

$$\rho J \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} = \frac{J}{S} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x \cdot \partial t}, \quad (10)$$

где J - момент инерции сечения стержня S относительно оси z .

Из уравнения (2) и вышеприведенных рассуждений следует, что процесс начала изгибно-сдвиговых колебаний происходит со свободного конца консольного стержня [13,17]. Поэтому на свободном конце стержня одновременно возникают сила $F(l,t)$ и момент силы $M(l,t)$ модули которых равны соответственно $\frac{1}{2}f(x,t)$ и $\frac{1}{2} \cdot \frac{J}{S} \cdot \dot{f}(x,t)$ образующую связанную пару (аналогично куперовской паре). Потому что, действуя независимо друг от друга, они бы вызывали соответственно чисто сдвиговые и чисто изгибные колебания. В работах по исследованию механизма очагов землетрясений их рассматривают не как связанные пары, а как двойную силу с моментом [5-7].

Естественно, возникают вопросы как создаются:

1. Внутренний распределенный импульс (количество движения) $p(x,t)$;
2. Связанная пара $F(l,t)$ и $M(l,t)$.

Наибольшую трудность для понимания создает возникновение связанной пары $F(l,t)$ и $M(l,t)$ на свободном конце консольного стержня. Известно, что возникновение всех «инерционных воздействий» связано с плотностью ρ (массой) однородного стержня. Однако на конце стержня элементарная масса $\Delta m = \rho S \Delta x$ отсутствует. Поэтому необходимы новые подходы для объяснения возникновения связанной пары $F(l,t)$ и $M(l,t)$.

В работе [12] показано, что система уравнения (8)-(9) распространения изгибно-сдвиговых колебаний консольного стержня аналогична системе телеграфных уравнений

$$\begin{cases} L \frac{\partial I}{\partial t} = -\frac{\partial V}{\partial x}, & (11) \\ C \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial I}{\partial x}, & (12) \end{cases}$$

описывающей распространение тока проводимости в однопроводной линии, где L, C - индуктивность и емкость единицы длины провода, V - напряженность, I - ток.

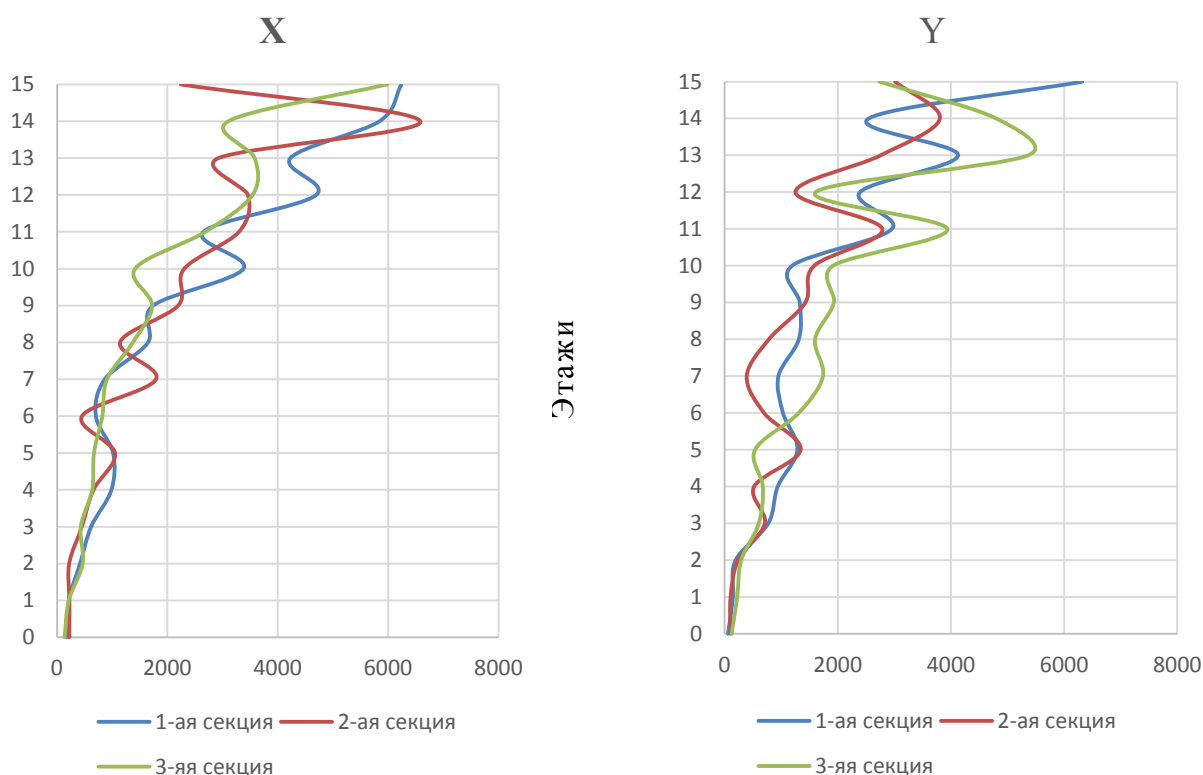


Рисунок 6 – Скорости микроколебаний соответствующих этажей жилого дома (в милливольтгах)

Figure 6 – Velocities of microvariations of the floors of the residential building (in millivolts)

В работе [17] показано, что ток проводимости в однопроводной линии передается следующим образом. По проводу мгновенно передается потенциал $\bar{V}_0(t)$, а на конце провода происходит поляризация электронов (позитронов) по всей площадке сечения S провода, которые создают электрическое напряжение $E(l, t) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \bar{V}_0(t)}{\partial x}$. Это напряжение в виде электрического тока проводимости (поляризованных электронов (позитронов)) распространяется в однопроводной линии.

При рассмотрении вопроса, как возникает связанная пара $F(l, t)$ и $M(l, t)$ мы должны принять (сделать заключение), по аналогии с тем, как распространяется ток проводимости в однопроводной линии, что существуют «гравитационные заряды» которые на свободном конце стрижня поляризуются и создают связанную пару $F(l, t)$ и $M(l, t)$.

В работе предлагается по аналогии с работой [17] ввести понятия гравитационного монополя и гравитационного заряда. Связанная пара $F(l, t)$ и $M(l, t)$ создается гравитационным монополем.

Следует отметить, что в ИГИС НАН РА настоящее время развиваются методы экспериментальных научных исследований в области сейсмостойкого строительства, способствующие получению инструментальной информации о колебаниях зданий и сооружений, возведенных в натуре, а также прилегающих к ним участков грунтов при микросейсмических колебаниях, с помощью специально разработанных регистрирующих приборов. Коэффициент преобразования милливольтга в скорость м/с $K=15000$ [8-10].

Экспериментальным путем полученные инструментальные материалы могут послужить исходными данными для проверки и уточнения методов расчета и проектирования зданий и сооружений в сейсмических районах (рис.6). Эти данные также позволяют оценить фактическую несущую способность сооружений при сейсмических воздействиях [8-10]. При этом, экспериментально можно установить взаимосвязь между уровнем напряженно-деформированного состояния и величиной периода собственных колебаний конструкций. На типовых зданиях было установлено, что по мере накопления повреждений периоды собственных колебаний несущих конструкций увеличиваются [8-10], следовательно, экспериментальные результаты испытаний, проведенных в натуральных условиях возведенных зданий и сооружений типовых объектов, дают возможность не только оценивать реальное воздействие сейсмических сил, но и динамические характеристики, и реальное состояние сооружения.

При этом, кроме определения периодов свободных колебаний и декрементов затухания рассмотренных зданий, представляют интерес также ряд других, не менее важных вопросов для сейсмостойкости зданий и сооружений, таких, как взаимодействие между фундаментом сооружения и его основанием (грунтом), распределение сейсмических ускорений по высоте, определение относительных подвижек в наиболее ответственных узлах и соединениях и др. [8-10].

Полученные по гравитационно-вихревой теории сейсмостойкости расчетные схемы показывают, что даже в одномерных моделях имеется четырехкратный резерв по оценке перерезывающих сил и моментов (2×2). Как видно из рисунков 1-4 сила инерции $-\rho S \ddot{U}(t)$ при изгибе и сдвиге принимает участие с коэффициентом $\frac{1}{2}$. Второй коэффициент 2 появляется, если расчеты производим по задаче 3 (модели), так как в этом случае жесткость стержня увеличивается в два раза.

Данные расчетные схемы нами были модернизированы и привлечены при рассмотрении различных моделей подготовки тектонического землетрясения в коллизионных зонах и возникновения различных сейсмических волн в ближней зоне землетрясения [19,23,24].

Когда новая гравитационно-вихревая теория сейсмостойкости уже создана и экспериментально проверена, можно ретроспективно оценить сложности, которые возникали при ее построении. Фактически с первых шагов ее построения необходимо было выйти за рамки классической и частично квантовой механики. Если непредвзято оценить работу авторов, то фактически предложены принципиально новые понятия и подходы. Некоторые понятия за эти 25 лет постепенно получили признание и употребление в работах крупных ученых в области механики и электродинамики [3,22,23]. Это говорит о том, что создается сообщество ученых, которые для решения передовых задач в своей области выходят на качественно новый уровень знаний и моделей [26].

Заключение

Полученные в работе расчетные схемы соответственно для задачи 1 (рис. 2а и 4б) и задачи 3 (рис. 2в и 3а), по мнению авторов, должны стать основой новой теории сейсмостойкости.

Близкие расчетные схемы в теории сейсмостойкости рассматриваются в методе стоячих волн, разработанном группой под руководством А.Ф. Еманова [7,28].

Список литературы

1. Аптикаев Ф.Ф. Проблемы создания шкалы сейсмической интенсивности нового поколения // Вулканология и сейсмология. 1999. №.4-5. С.23-28.
2. Бюс Е., Гигинейшвили В. Ленинанканское землетрясение 22 октября 1926 г. (по макросейсмическим наблюдениям) // Оттиск из кварталного сейсмологического бюллетеня. 1943. Т. 12. № 12. Тбилиси. С. 39-108.
3. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. 1967. Т. 92. С. 517–532.
4. Геодакян Э.Г. О геодинамической модели очага Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. В кн.: Сб. научных трудов конф., посв. 60-летию основания НАН РА. Гюмри: Изд. «Гитутюн» НАН РА. 2004. С. 64-78.
5. Геодакян Э.Г., Голинский Г.Л., Папалашвили В.Г., Хромецкая Е.А., Щебалин Н.В. Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. Карты изосейст // Землетрясения в СССР в 1988 году. М.: Изд-во Наука. 1991. С.74-85.
6. Гусев А.А. О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России // Известия РАН. Физика Земли. 2002. №.12. С.56-70.
7. Еманов А.Ф., Каргаполов А.А., Колесников Ю.И., Федин К.В. Диагностирование потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам: лабораторный эксперимент // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. 2013. №.4. С. 84-90.
8. Карапетян Дж. К. Сопоставительный анализ расчетных кривых коэффициента динамичности β (T,n), полученных различными методами // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т.39. №3. С. 33-40.
9. Карапетян Дж. К. Статистический анализ количественных параметров сейсмического воздействия Японского 11.03.2011 землетрясения. В кн.: Сб. научных трудов конференции, посвященной 50-летию основания ИГИС НАН РА. Гюмри, Изд. «Гитутюн» НАН РА. 2011. С. 344-362 (Арм. яз.).
10. Карапетян Дж. К., Айрапетян О. Ю., Мхитарян Д. А. Анализ динамических характеристик здания комплексной конструкции // Геология и геофизика Юга России. 2019. Том 9. № 1. С. 110-121. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26792.
11. Назаров А.Г. Некоторые вопросы количественной оценки сейсмических воздействий. В кн: Методы количественной оценки сейсмических воздействий. Тбилиси: Мецниереба. 1983. С.5-16.
12. Оганесян С.М. Аналогия системы уравнений описывающие изгибные колебания однородного консольного стержня с телеграфными уравнениями // Сборник научных трудов IV конференции: Актуальные проблемы механики сплошной среды. Ереван. 2015. С. 309-311.
13. Оганесян С.М. К вопросу о построении новой теории сейсмостойкости // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 5. С. 26-29.
14. Оганесян С.М. К построению модели массы // Геофизический журнал. 1998. Т.20. №5. С.3-5.
15. Оганесян С.М. К реальности силы инерции Даламбера. В кн.: Сб. научных трудов конференции, посвященной 50-летию памяти к.г.-м.н. А.Г. Бабаджаняна. Гюмри: Изд. «Гитутюн» НАН РА. 1999. С.295-303.
16. Оганесян С.М. Обобщение решения задачи продольных колебаний упругих систем. Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства. Сб. науч. трудов II международной научной конференции молодых ученых. Цахкадзор-2015-Ереван. Изд. «Гитутюн» НАН РА. 2016. С.391-393.

17. Оганесян С.М. Постановка задач о распространения упругих волн чистого изгиба и изгиба при поперечных колебаниях однородного консольного стержня // ДНАН Армении. 2013. Т.113. № 3. С.259-267.
18. Оганесян С.М. Регулярные методы решения трехмерных задач гравиметрии. Ереван-Гюмри: Изд. «Гитутюн» НАН РА. 2004. 381с.
19. Оганесян С.М., Геодакян Э.Г., Карапетян Дж. К., Саакян Б.В., Андикян М.А. К вопросу о возникновении сдвиговой подвижки по изгибной модели подготовки тектонического землетрясения. В кн.: Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства. Сб. науч. трудов II международной научной конференции молодых ученых. Цахкадзор-2015-Ереван: Изд. «Гитутюн» НАН РА. 2016. С.260-265.
20. Оганесян С.М., Геодакян Э.Г., Саакян Б.В. О сложной природе накопления напряжений в зоне коллизии подготовки тектонического землетрясения. Коллективная монография. Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. VII международная научно-практическая конференция, Владикавказ, 30 сентября-02 октября 2019. С.55-66.
21. Оганесян С.М., Оганесян А.О., Геодакян Э.Г., Гаспарян Г.С., Григорян В.Г. Выделение зон возникновения очагов землетрясений на основе сейсмологической идентификации и параметризации основных элементов структурно динамической модели земной коры Армении. Изв. НАН РА, Науки о Земле. 2008. №1. С.39-43.
22. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. № 1.С. 5-22.
23. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Наука. 2007. 406 с.
24. Саакян Б.В. Сейсмическое отражение сложных геодинамических процессов в орогенах Большого и Малого Кавказа // Геология и геофизика Юга России. 2018. № 2. С. 90-98.
25. Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. Научно-технический отчет ИГИС АН РА (в двух томах). Ленинанкан. Фонды ИГИС НАН РА. 1990. Т.1, с. 293, т.2, с. 400.
26. Томас Кун. Структура научных революций. М.: Изд. Прогресс. 1977. 302 с.
27. Уломов В.И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе единой информационной системы «Сейсбезопасность России» // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. №1. Т.39. С. 5-38.
28. Федин К.В. Физическое моделирование стоячих волн для решения задач инженерной сейсмологии. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск. 2014. 119 с.
29. Soils and foundations. Special issue of Geotechnical aspects of January 17 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, Japanese Geotechnical Society, January, 1996. 359 p.
30. Survey A. Report for building damages due to the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake. Building Research Institute; Ministry of Construction (Japan) March, 1996. 226 p.

References

1. Aptikaev F.F. 1999. Problems of creating a new generation seismic intensity scale. *Volcanology and seismology*, no. 4-5. pp. 23-28 (In Russian)
2. Byus E., Gigineishvili V. 1943. Leninakan earthquakes on October 22, 1926 (according to macroseismic observations). Imprint from the quarterly seismological bulletin vol. 12, no. 12, Tbilisi, pp. 39-108. (In Russian)
3. Veselago V.G. 1967. Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Uspekhi fizicheskikh nauk*. V. 92, pp. 517-532. (In Russian)

4. Gedakyan E.G. 2004. On the geodynamic model of the source of the Spitak earthquake on December 7, 1988. In the book: Sb. scientific papers conf., dedicated. 60th anniversary of the foundation of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia. Gyumri: Publishing House of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, pp. 64-78. (In Russian)
5. Geodakyan E.G., Golinsky G.L., Papalashvili V.G., Khrometskaya E.A., Schebalin N.V. 1991. Spitak earthquake on December 7, 1988. Isoseist maps. Earthquakes in the USSR in 1988. M.: Publishing house Nauka, pp. 74-85. (In Russian)
6. Gusev A.A. 2002, On the basis of seismological earthquake-resistant construction standards in Russia. Math. Russian Academy of Sciences, Physics of the Earth, no.12, pp.56-70. (In Russian)
7. Yemanov A.F., Kargapolov A.A., Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. 2013. Diagnostics of stability loss of pipeline supports by acoustic noise: laboratory experiment. Vestnik NSU. Series: Mathematics, Mechanics, Informatics, no.4, pp.84-90. (In Russian)
8. Karapetyan J.K. 2012. Comparative analysis of the calculated curves of the dynamic factor β (T, n), obtained by different methods. Questions of engineering seismology. Vol. 39, no. 3, pp. 33-40. (In Russian)
9. Karapetyan J.K. 2011. Statistical analysis of the quantitative parameters of the seismic impact of the Japanese 11.03.2011 earthquake. In the book: Sat. scientific papers of the conference dedicated to the 50th anniversary of the founding of ISIS NAS RA. Gyumri, Ed. «Gitutyun», NAS RA, pp. 344-362 (In Armenian)
10. Karapetyan J. K., Airapetyan O. Yu., Mkhitaryan D. A. 2019. Analysis of the dynamic characteristics of a complex structure building. Geology and geophysics of the South of Russia. Vol. 9, no. 1, pp. 110-121. DOI: 10.23671 / VNC.2019.1.26792. (In Russian)
11. Nazarov A.G. 1983. Some questions of the quantitative assessment of seismic impacts. In the book: Methods for the quantitative assessment of seismic impacts. Tbilisi: Metsniereba, pp. 5-16. (In Russian)
12. Hovhannisyan S.M. 2015, Analogy of the system of equations describing bending vibrations of a homogeneous cantilever bar with telegraph equations. Collection of scientific papers of the IV conference: Actual problems of continuum mechanics. Yerevan: pp. 309-311. (In Russian)
13. Hovhannisyan S.M. On the question of building a new theory of seismic stability. Earthquake engineering. Construction safety. 2013, no. 5, pp. 26-29. (In Russian)
14. Hovhannisyan S.M. 1998. On the construction of a mass model. Geophysical journal, v.20, no. 5, pp. 3-5. (In Russian)
15. Hovhannisyan S.M. 1999. To the reality of the force of inertia of d'Alembert. In the book: Sat. Sci. Proceedings of the conf. dedicated 50th anniversary of the memory of Ph.D. A.G. Babajanyan. Gyumri: Ed. «Gitutyun» NAS RA, pp. 295-303. (In Russian)
16. Hovhannisyan S.M. 2016. Generalization of the solution to the problem of longitudinal vibrations of elastic systems. Modern problems of geophysics, engineering seismology and earthquake-resistant construction. Sat. scientific. Proceedings of the II International Scientific Conf. young scientists, Tsaghkadzor-2015-Yerevan. Publishing house «Gitutyun» NAS RA, pp. 391-393. (In Russian)
17. Hovhannisyan S.M. 2013. Statement of problems on the propagation of elastic waves of pure bending and bending under transverse vibrations of a homogeneous cantilever bar. DNAN Armenia, v. 113, no. 3, pp. 259-267. (In Russian)
18. Hovhannisyan S.M. 2004. Regular methods for solving three-dimensional problems of gravimetry. Yerevan-Gyumri: Publishing house «Gitutyun» NAS RA, 381 p. (In Russian)
19. Hovhannisyan S.M., Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Sahakyan B.V., Andikyan M.A. 2016. On the issue of the occurrence of shear displacement according to the flexural model of

- the preparation of a tectonic earthquake. - In the book. Modern problems of geophysics, engineering seismology and earthquake-resistant construction. Sat. scientific. Proceedings of the II International Scientific Conf. young scientists, Tsaghkadzor-2015-Yerevan: Publishing house «Gitutyun» NAS RA, pp.260-265. (In Russian)
20. Hovhannisyan S.M., Geodakyan E.G., Sahakyan B.V. 2019. On the complex nature of stress accumulation in the collision zone of the preparation of a tectonic earthquake. Collective monograph. Hazardous natural and man-made processes in mountainous regions: models, systems, technologies. (VII International Scientific and Practical Conference, Vladikavkaz, September 30-October 02, 2019), Vladikavkaz, pp. 55-66. (In Russian)
 21. Hovhannisyan S.M., Hovhannisyan H.H., Geodakyan E.G., Gasparyan G.S., Grigoryan V.G. 2008. Identification of zones of origin of earthquake foci on the basis of seismological identification and parameterization of the main elements of the structural dynamic model of the earth's crust in Armenia. Izv. NAS RA, Earth Sciences, no.1, pp. 39-43. (In Russian)
 22. Panin V.E. Fundamentals of physical mesomechanics. Physical mesomechanics. 1998, no. 1, pp. 5-22. (In Russian)
 23. Rebetskiy Yu.L. Tectonic Stresses and Strength of Mountain Massifs. Moscow: Nauka. 2007. 406 p. (In Russian)
 24. Sahakyan B.V. 2018. Seismic reflection of complex geodynamic processes in the orogens of the Greater and Lesser Caucasus. Geology and Geophysics of the South of Russia. No. 2, pp. 90-98. (In Russian)
 25. Spitak earthquake on December 7, 1988. Scientific and technical report of IGIS AS RA (in two volumes). Leninakan, 1990, funds of the ISIS NAS RA, vol. 1, p. 293, vol. 2, p. 400. (In Russian)
 26. Thomas Kuhn. The structure of scientific revolutions. 1977. Moscow: Ed. Progress. 302 p. (In Russian)
 27. Ulomov V.I. 2012. Actualization of normative seismic zoning as part of the unified information system «Seismic safety of Russia». Questions of engineering seismology. No. 1, v.39, pp. 5-38. (In Russian)
 28. Fedin K.V. 2014. Physical modeling of standing waves for solving problems of engineering seismology. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Novosibirsk.119p.
 29. Soils and foundations. Special issue of Geotechnical aspects of January 17, 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, Japanese Geotechnical Society, January, 1996. 359 p.
 30. Survey A. 1996. Report for building damages due to the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake. Building Research Institute; Ministry of Construction (Japan) March, 226 p.

Информация об авторах/Information about authors

Оганесян Севада Мкртычевич *, член-корр. НАН РА Армения, доктор физ-мат наук, сов. директора и зав. Отделом Института геофизики и инженерной сейсмологии им. акад. А. Назарова НАН РА (ИГИС НАН РА), iges@mail.ru, (+374) 93 42-04-43

Hovhannisyan Sevada M., corr.-member NAS RA Armenia, doctor of Physics and Mathematics, sov. director and head laboratory of the Institute of Geophysics and Engineering Seismology after named acad. A. Nazarov NAS RA (IGES NAS RA), iges@mail.ru, (+374) 93 42-04-43

Карапетян Джон Костикович, канд. геол. наук, директор и зав. отделом ИГИС НАН РА, jon_iges@mail.ru, (+374) 94 79-85-80

Karapetyan John K., cand. geol. sciences, director and head laboratory of IGES NAS RA, jon_iges@mail.ru, (+374) 94 79-85-80

Геодакян Э. Г., канд. физ.-мат. наук, зав. отделом ИГИС НАН РА, geodakyan.e@mail.ru, (+374) 93 51-31-23

Geodakyan E.G., cand. physical-mat. sciences, head laboratory of IGES NAS RA, geodakyan.e@mail.ru, (+374) 93 51-31-23

Саакян Б. В., научный сотрудник ИГИС НАН РА, sahakyan_babken@mail.ru, (+374) 93 62-66-53

Sahakyan B. V., Researcher of IGES NAS RA, sahakyan_babken@mail.ru, (+374) 93 62-66-53

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9283-2021-5-36-49](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-36-49)

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов

Бабский Александр Евгеньевич¹, Тарасов Владимир Александрович²

¹Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-Петербургский проектный институт». Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-Петербургский проектный институт». Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: Фундамент турбоагрегата – специальная строительная конструкция, объединяющая части турбоагрегата в единую систему и служащая для восприятия статических и динамических нагрузок. Количество проектируемых и строящихся электростанций в районах с высоким уровнем сейсмичности велико.

Сейсмоизоляция – эффективнейший способ достижения сейсмостойкости зданий и сооружений, находящегося в них оборудования. Достижения сейсмостойкости фундамента турбоагрегата электростанции путём применения разнообразных конструктивных решений и систем сейсмоизоляции является актуальным вопросом.

Динамические расчеты проводятся в программном комплексе Nastran [6] 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 деформаций изоляторов виброизолированного фундамента.

В ходе исследования выполнены вычислительные эксперименты, результаты которых позволяют оценить влияние на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов различного частотного состава сейсмического воздействия, использования виброизоляторов различной жёсткости, учёта частотной зависимости характеристик вязких демпферов и использования различных методов расчёта и расчётных схем.

Ключевые слова: виброизолированный фундамент турбоагрегата, спектры ответа, сейсмостойкость, землетрясение, сейсмоизоляция, динамика сооружений, сейсмический расчет

Для цитирования: Бабский А.Е., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С. 36-49. DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-36-49](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-36-49)

@ Бабский А.Е., Тарасов В.А., 2021

Seismic safety and seismic isolation of buildings

Seismic stability of vibration-insulated turbine foundations

Aleksandr E. Babsky¹, Vladimir A. Tarasov²

¹ JSC Atomenergoproekt St. Petersburg Branch – St. Petersburg Design Institute.
Saint Petersburg, Russian Federation

² JSC Atomenergoproekt St. Petersburg Branch – St. Petersburg Design Institute
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract: The turbogenerator set foundation is a special building structure that unites parts of the turbine and generator unit into a single system 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.

Seismic isolation is the most effective way to achieve earthquake resistance of equipment located inside buildings and structures. Achievement of seismic stability power plant turbine foundation by applying a variety of design solutions and seismic isolation systems is a significant issue.

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 deformations of vibration isolators.

The results of computational experiments during investigations allow to estimate the effect of the following factors on seismic resistance of vibration isolated turboset foundations:

- different frequency composition of seismic impact;
- use of vibration isolators of different stiffness;
- accounting of frequency dependence of viscous dampers characteristics;
- use of different calculation methods and computational models.

Keywords: vibration-insulated turbogenerator set foundation, response spectra, seismic stability, earthquake, seismic isolation, structural dynamics, seismic calculation

For citation: Babsky A.E., Tarasov V.A. Seismic stability of vibration-insulated turbine foundations. *Seismostoi koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* = *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 36-49. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-36-49](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-36-49)

ВВЕДЕНИЕ

Несколько проектов АЭС, актуальных на сегодняшний день, реализуются на площадках, характеризующихся высоким уровнем сейсмичности и значительными уровнями ПЗ и МРЗ. По Российским нормам [1] АЭС должна обеспечивать выработку (выдачу) электрической и тепловой энергии вплоть до уровня ПЗ включительно. В настоящее время на площадках с уровнем ПЗ больше 0.1g проектируются станции: Пакш-2, Аккую, Руппур, Эль-Дабаа. Геология многих площадок из указанных выше проектов представлена слабыми грунтами с модулем деформации 20 МПа и менее. На площадках могут присутствовать грунты, склонные к разжижению при сейсмике.

Данная работа посвящена исследованию влияния различных факторов на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов и поиску конструктивных решений, повышающих их уровень сейсмостойкости.

Существует два метода обоснования сейсмостойкости: опытный и расчётный. Турбоагрегаты массой от 100 до 10000 т практически невозможно испытать даже на уникальных стендах. Поэтому для виброизолированных фундаментов мощных турбоагрегатов возможно использование лишь расчётного метода обоснования их сейсмостойкости. В связи с этим, актуальной задачей является определение спектров сейсмических ускорений, а также сейсмических перемещений на отметке установки турбоагрегата, а также поиск конструктивных возможностей для их снижения [2].

Принципиальная схема виброизолированного фундамента турбоагрегата в составе здания турбины представлена на рисунке 1. Турбоагрегат, соединённый с конденсаторами, устанавливается на виброизолированный фундамент. Конденсаторы снизу устанавливаются на пружинные опоры. Уровень 8 соответствует уровню установки турбоагрегата.

Для проведения вычислительных экспериментов использовалась конечноэлементная модель виброизолированного фундамента турбоагрегата в составе здания турбины со следующими параметрами:

- быстроходный турбоагрегат К-1200, мощностью 1200 МВт, 3000 об/мин, производитель АО «Силовые машины» («ЛМЗ»+«Электросила»);
- общая масса виброизолированного фундамента турбоагрегата с оборудованием составляет 8285 т;
- здание турбины имеет размеры в плане 124x73 м, массу 154400 т. Бетон строительных конструкций класса В25.

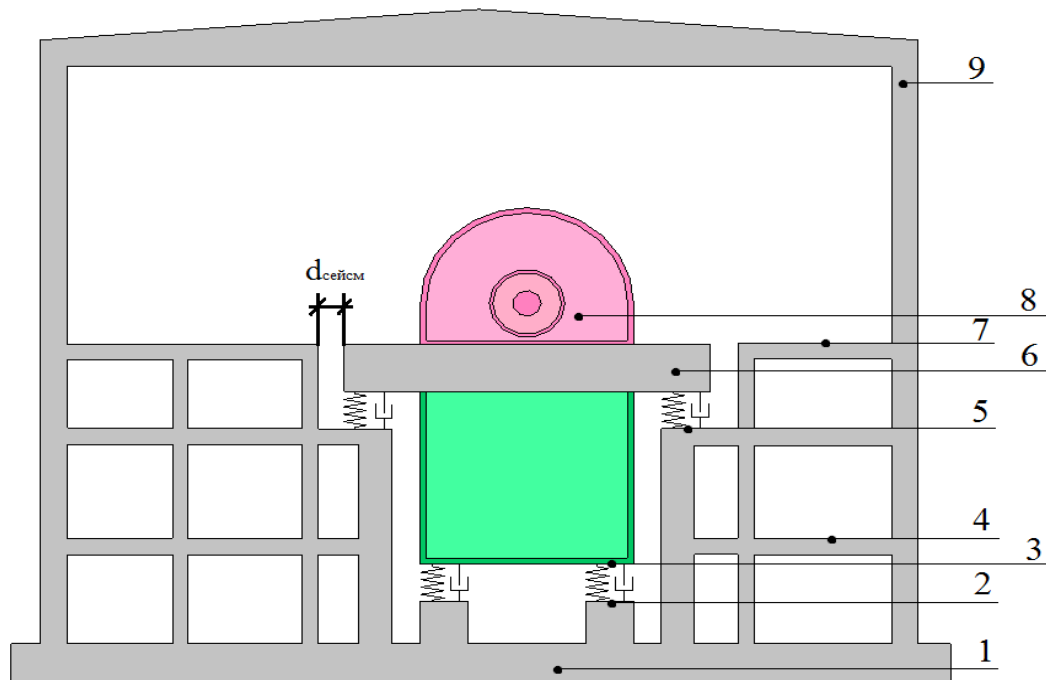


Рисунок 1 – Поперечный разрез здания турбины с виброизолированным фундаментом турбоагрегата

Figure 1 – Cross section of the turbine building with the vibration-insulated turbine foundation

Первая серия расчётов содержит вычислительные эксперименты, результаты которых характеризуют влияние учитываемой величины демпфирования в грунтах основания на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов. Проведены расчёты полностью аналогичных расчётных схем на грунтах сильной сжимаемости с различными величинами относительного демпфирования. Для первой расчётной схемы динамические характеристики грунтов основания определены по ASCE 4-16 [9] с учётом ограничений демпфирования $\xi_z=0.35$, $\xi_x=0.15$, $\xi_\phi=0.15$, для второй – без ограничения величин демпфирования, для третьей демпфирование в основании не учитывалось.

На рисунке 2 представлены спектры отклика на оборудовании в осевом направлении, в таблице 1 представлены величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов, а также взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания.

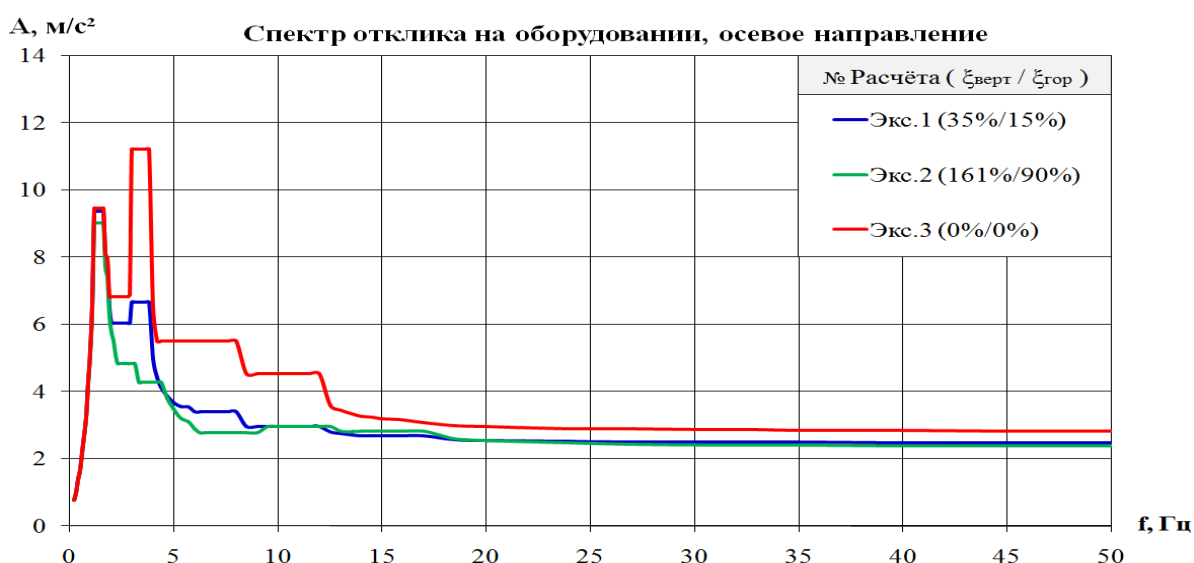


Рисунок 2 – Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 2 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 1 – Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 1 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

	Экс.1	Экс.2	Экс.3
Виброизолятор под конденсатором	14.2	13.5	13.6
Виброизолятор под ФТА	45.7	40.6	50.8
ФТА–отметка обслуживания	47.0	41.7	54.2

Учёт завышенного демпфирования в основании приводит к неконсервативному занижению максимальных сейсмических ускорений на 5-30% и потере некоторых пиков. Деформации изоляторов занижаются на 10-15%.

В свою очередь, не учёт демпфирования в основании приводит к завышению максимальных сейсмических ускорений на 15-50% и завышению значений деформаций изоляторов на 15%. Рекомендуется учитывать демпфирования в грунтах основания, но в случае получения околокритических значений ограничивать его величину.

Второй серии вычислительных экспериментов варьировалось внешнее воздействие, а именно выполнены расчёты на сейсмические воздействия с одинаковой интенсивностью (акселерограммы нормированы на 1 м/с^2) но с различным частотным составом.

На рисунке 3 представлены спектры отклика на оборудовании в осевом направлении, в таблице 2 представлены величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов, а также взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания.

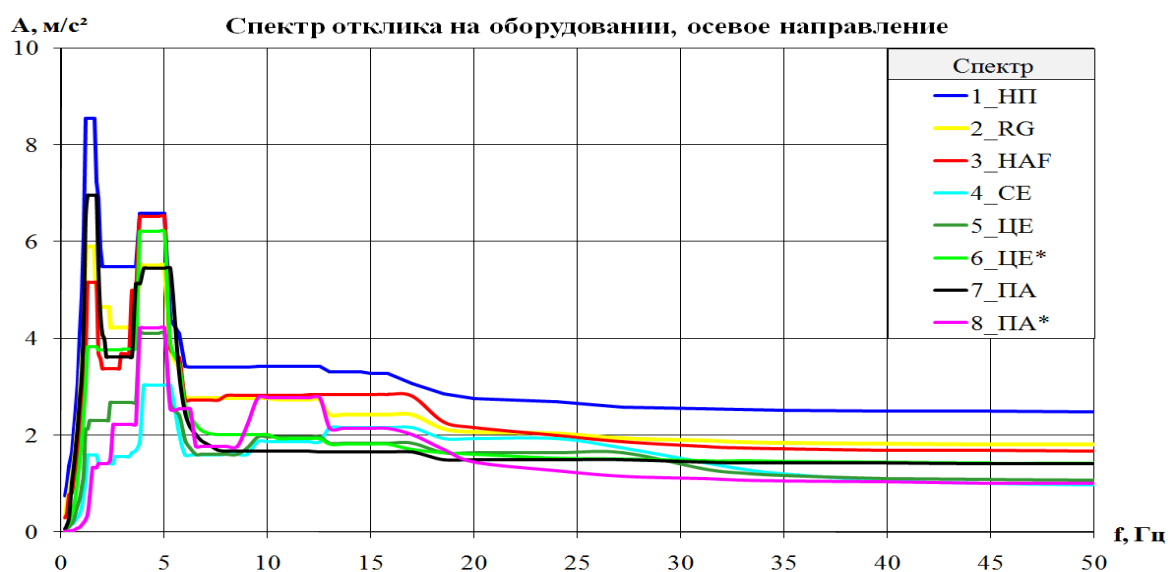


Рисунок 3 – Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 3 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 2 – Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 2 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

	1_НП	2_RG	3_HAF	4_СЕ	5_ЦЕ	6_ЦЕ*	7_ПА	8_ПА*
Виброизолятор под конденсатором	13.6	8.9	6.5	2.5	3.4	5.3	7.5	1.6
Виброизолятор под ФТА	42.5	30.6	20.6	9.5	14.7	20.4	25.9	8.7
ФТА-отметка обслуживания	46.0	33.2	24.4	11.3	17.3	24.0	29.3	11.2

Получены значения максимальных сейсмических ускорений на фундаменте турбоагрегата в осевом направлении отличающиеся более чем в 2.5 раза: от 0.9 м/с^2 до 2.4 м/с^2 . Значения сейсмических деформаций изоляторов отличаются более чем в 4 раза.

Виброизолированные ФТА имеют основную форму колебаний в осевом направлении с частотой входящей в диапазон от 1 до 4 Гц. Сейсмическое воздействие с преобладающими частотами входящими в данный диапазон вызывает большой отклик системы, нежели более высокочастотное сейсмическое воздействие [5].

Третья серия вычислительных экспериментов связана с учётом изоляторов с разным соотношением горизонтальных и вертикальных жесткостей. ТН - изоляторы с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 6, ТХ - 1 к 3, ТР - 1 к 1.

На рисунке 4 представлены спектры отклика на оборудовании в осевом направлении, в таблице 3 представлены величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов, а также взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания.

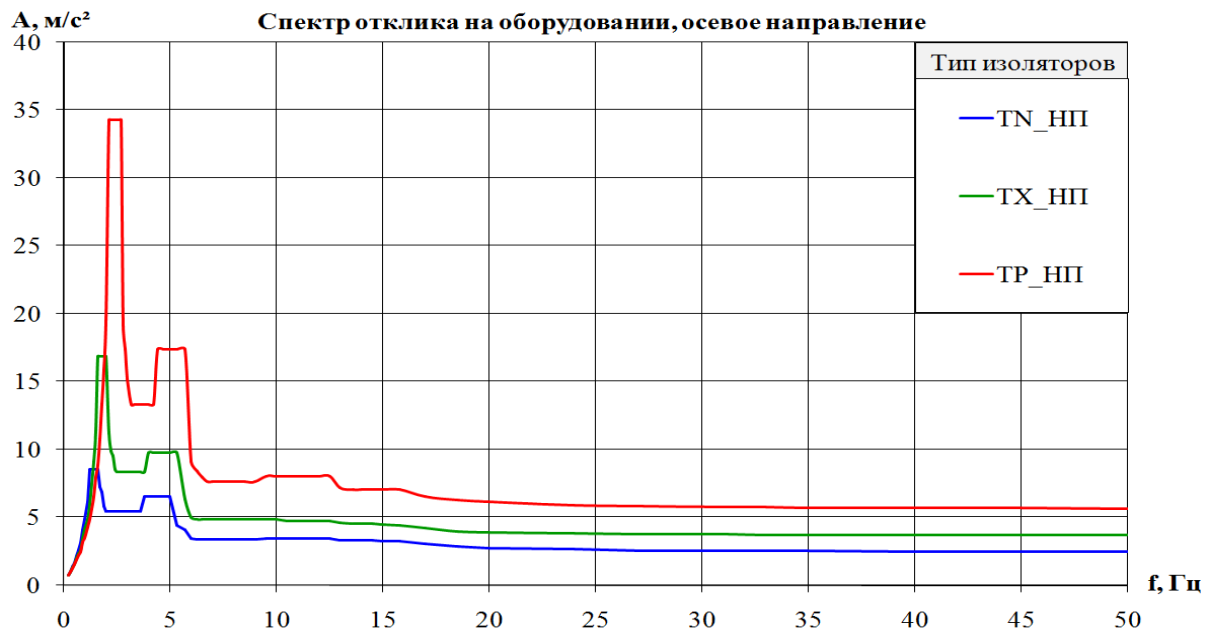


Рисунок 4 - Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 4 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 3 – Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 3 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

	Экс.1	Экс.2	Экс.3
Виброизолятор под конденсатором	13.6	12.5	15.6
Виброизолятор под ФТА	42.5	34.0	25.5
ФТА-отметка обслуживания	46.0	41.1	37.3

Увеличение суммарной горизонтальной жёсткости изоляторов приводит к росту частоты основной формы колебаний в осевом направлении: с 1.3 Гц на «мягких» изоляторах ТН до 1.7 Гц при «средних» изоляторах ТХ и до 2.2 Гц при «жёстких» изоляторах ТР. Это приводит к росту максимальных сейсмических ускорений в 1.5-2 раза. Величина сейсмических деформаций изоляторов под ФТА снижается на 20-40%. Для достижения сейсмостойкости виброизолированного ФТА по параметру максимального ускорения в осевом направлении на турбоагрегате необходимо использовать «мягкие» изоляторы с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей входящих в диапазон от 1 к 5 до 1 к 6. Сейсмические перемещения следует уменьшать не увеличением жёсткости изоляторов, а увеличением затухания, путём добавления в систему дополнительных демпфирующих устройств [3-4].

Четвёртая серия вычислительных экспериментов связана с проведением сейсмических расчётов виброизолированных фундаментов отдельно и в составе здания турбины. На рисунке 5 представлена схема и конечноэлементная модель фундамента турбоагрегата без моделирования конденсаторов, на рисунке 6 - с моделированием конденсаторов, на рисунке 7 - конечноэлементная модель фундамента турбоагрегата в составе здания турбины.

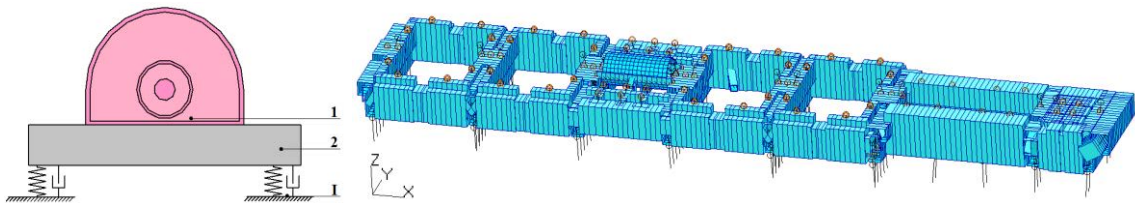


Рисунок 5 - Схема и конечноэлементная модель фундамента турбоагрегата без моделирования конденсаторов

Figure 5 – Scheme and finite element model of the turbine foundation without condensers modeling

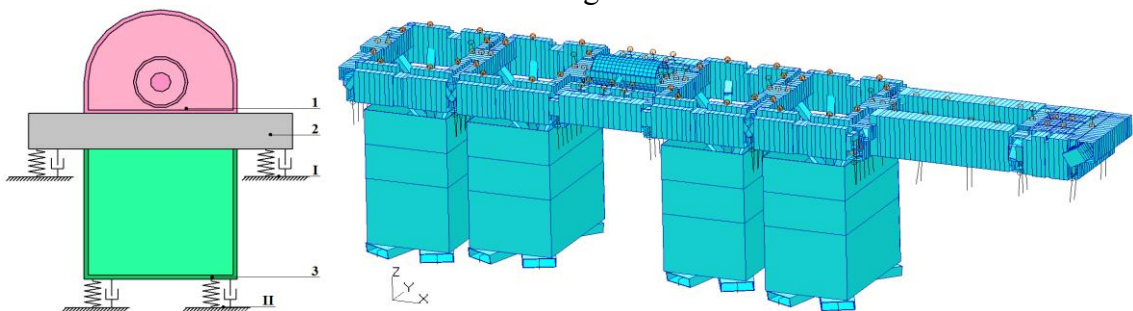


Рисунок 6 - Схема и конечноэлементная модель фундамента турбоагрегата с моделированием конденсаторов

Figure 6 – Scheme and finite element model of the turbine foundation with modeling of condensers

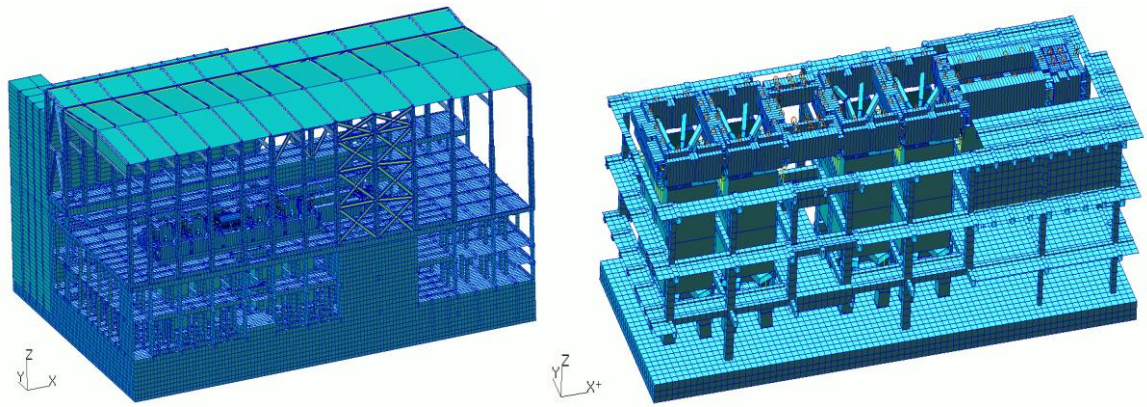


Рисунок 7 - Конечноэлементная модель фундамента турбоагрегата в составе здания турбины

Figure 7 – Finite element model of the turbine foundation as part of the turbine building

Часто, в проектных организациях, занимающихся комплексным проектированием электростанций, в виду сложности динамических расчётов, отсутствует возможность произвести проектирование и расчёт фундамента турбоагрегата собственными силами. В этом случае для выполнения комплексного проекта и расчётов виброизолированного фундамента турбоагрегата, данные организации вынуждены обращаться к субподрядной организации. При этом организация главный подрядчик, отдающая проект фундамента турбоагрегата на субподряд обычно оставляет за собой проект и расчёт здания турбины (машинного зала). В этом случае расчётчик сталкивается с проблемой расчёта виброизолированного фундамента турбоагрегата отдельно от здания турбины.

На рисунке 8 представлены спектры отклика на оборудовании в осевом направлении, в таблице 4 представлены величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов.

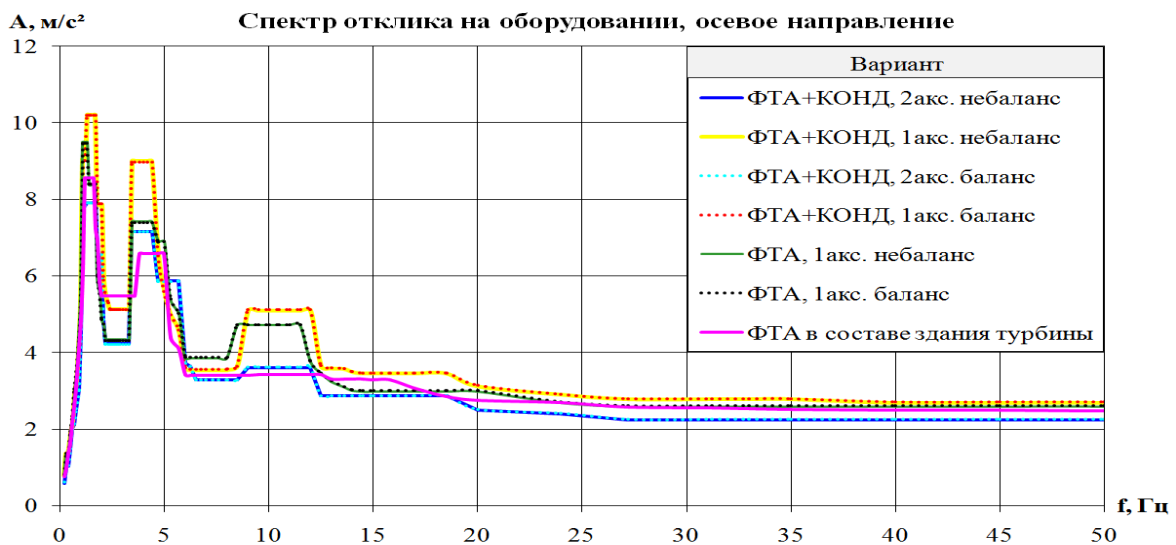


Рисунок 8 - Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 8 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 4 - Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 4 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

Акселерограммы	ФТА+КОНДЕНСАТОР				ФТА		ФТА в составе здания турбины
	2 н/б	1 н/б	2 б	1 б	1 н/б	1 б	
Виброизолятор под конденсатором	2018.6	13.9	509.4	13.9	-	-	13.6
Виброизолятор под ФТА	2037.0	29.8	573.3	29.1	30.2	31.0	42.5

Модель фундамента турбоагрегата без конденсаторов рассчитана на комплекты несбалансированных и сбалансированных акселерограмм, синтезированных из спектров на подпорных конструкциях. Величина ускорений практически совпадает со значением при расчёте ФТА в составе здания турбины, однако перемещения занижены более чем на 30%.

Модель фундамента турбоагрегата с конденсаторами рассчитана на комплекты несбалансированных и сбалансированных акселерограмм, синтезированных из спектров на подпорных конструкциях фундамента и конденсаторов, и на комплекты несбалансированных и сбалансированных акселерограмм, синтезированных из огибающих спектров. В первом случае ускорения занижены на 20%. И при несбалансированных акселерограммах, и при сбалансированных результаты расчёта сейсмических смещений некорректны. Происходит дрейф верхнего и нижнего уровня системы в разные стороны. Во втором случае ускорения завышены на 6%, что не критично, однако величины перемещений занижены более чем на 30%.

Пятая серия вычислительных экспериментов связана с проведением сейсмических расчётов виброизолированных фундаментов турбоагрегатов по линейно-спектральной теории и методом прямого интегрирования уравнений движения.

Сейсмические расчёты по линейно-спектральной теории были выполнены на спектры с 5% затуханием, расчёты методом прямого интегрирования уравнений движения выполнены по акселерограммам, синтезированным из спектров с 5% затуханием.

Учитывая тот факт, что при расчёте по линейно-спектральной теории не учитываются сосредоточенные демпферы, учтём затухание, вызываемое ими следующим образом: представим виброизолированный ФТА в виде колеблющейся массы, закреплённой пружиной и демпфером. Значение массы это сумма массы железобетонных конструкций фундамента, а также массы оборудования; значение жёсткости пружины по горизонтали - сумма горизонтальных жесткостей всех изоляторов, значение жёсткости пружины по вертикали - сумма вертикальных жесткостей всех изоляторов; аналогично значение горизонтального демпфирования есть сумма всех горизонтальных затуханий сосредоточенных демпферов, значение вертикального демпфирования - сумма всех вертикальных затуханий сосредоточенных демпферов. Важно, что данный подход не учитывает пространственный характер колебаний виброизолированных фундаментов турбоагрегатов, однако позволяет грубо оценить величину относительного затухания

системы, позволяющую выбрать спектр с более корректным затуханием для расчёта по линейно-спектральной теории.

Таким образом, дополнительно проведены расчёты отдельно фундамента турбоагрегата с моделированием конденсаторов и без них на сейсмические спектры с 24% затуханием по горизонтали и с 5% затуханием по вертикали. Рассчитывать фундамента в составе здания турбины на спектр с 24% затуханием не имеет никакого физического смысла.

В таблице 5 представлены результаты вычисления максимальных сейсмических смещений по линейно-спектральной теории и методом прямого интегрирования уравнений движения для отдельного фундамента турбоагрегата с конденсаторами и без конденсаторов, а также для фундамента турбоагрегата в составе здания турбины.

Таблица 5 – Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 5 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

Вариант моделирования	ФТА+КОНДЕНСАТОР			ФТА			ФТА в составе здания турбины	
	Прямое интегрирование	ЛСТ, 5%	ЛСТ, 24%	Прямое интегрирование	ЛСТ, 5%	ЛСТ, 24%	Прямое интегрирование	ЛСТ, 5%
Виброизолятор под конденсатором	13.9	35.7	18.1	-	-	-	13.6	24.7
Виброизолятор под ФТА	29.8	101.9	62.1	31.0	70.9	40.3	42.5	91.1

Использование линейно-спектральной теории при расчёте виброизолированного ФТА отдельно от здания турбины на спектры воздействия с 5% затуханием вызывает рост перемещений в 2 - 3 раза, в сравнении с прямым интегрированием. При использовании в расчёте спектров воздействия с 24% затуханием, соответствующим относительному затуханию в виброизолированном фундаменте турбоагрегата, величины перемещений завышены в 1.5 - 2 раза.

В то же время, при расчёте фундамента в составе здания турбины, линейно-спектральная теория даёт значения перемещений более чем в 2 раза превышающие значения перемещений при использовании метода прямого интегрирования уравнений движения. Данное обстоятельство объясняется тем, что при использовании метода прямого интегрирования, во-первых, возможно корректно учесть сосредоточенные демпферы под виброизолированным фундаментом и под конденсаторами, а во-вторых, получить величины перемещений со знаком и направлением.

Таким образом, для качественного и надёжного обеспечения сейсмостойкости виброизолированных фундаментов турбоагрегатов, необходимо проводить сейсмический расчёт виброизолированных фундаментов в составе здания турбины прямым интегрированием уравнений движения.

Заключительная серия вычислительных экспериментов посвящена учёту частотной зависимости динамических характеристик вязкого демпфера.

Используемые в виброизоляции фундамента турбоагрегата вязкие демпферы не являются идеально-вязкими. Они имеют приведённую жёсткости и величину демпфирования, зависящие от частоты колебаний. Учесть данные зависимости в расчётной схеме позволяет использование 4-х параметрической модели Максвелла, состоящей из пары цепочек, последовательно соединённых упругой пружины и вязкого демпфера, модель схематично представлена на рисунке 9.

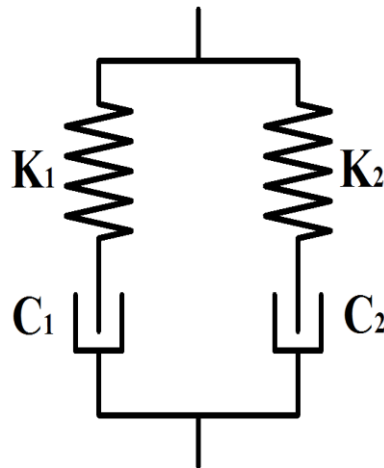


Рисунок 9 – 4-х параметрическая модель Максвелла

Figure 9 – Maxwell model

В работах [7-8] было показано, что при использовании упрощенных моделей демпфера: эквивалентной упругой модели или идеально вязкой модели, возможны ошибки как в консервативную сторону при эквивалентной упругой модели, так и в неконсервативную при идеально вязкой модели.

Проведены расчёты виброизолированного фундамента турбоагрегата с учётом и без учёта частотной зависимости динамических характеристик вязких демпферов.

На рисунке 10 представлены спектры отклика на оборудовании в осевом направлении, в таблице 6 представлены величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов, а также взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания.

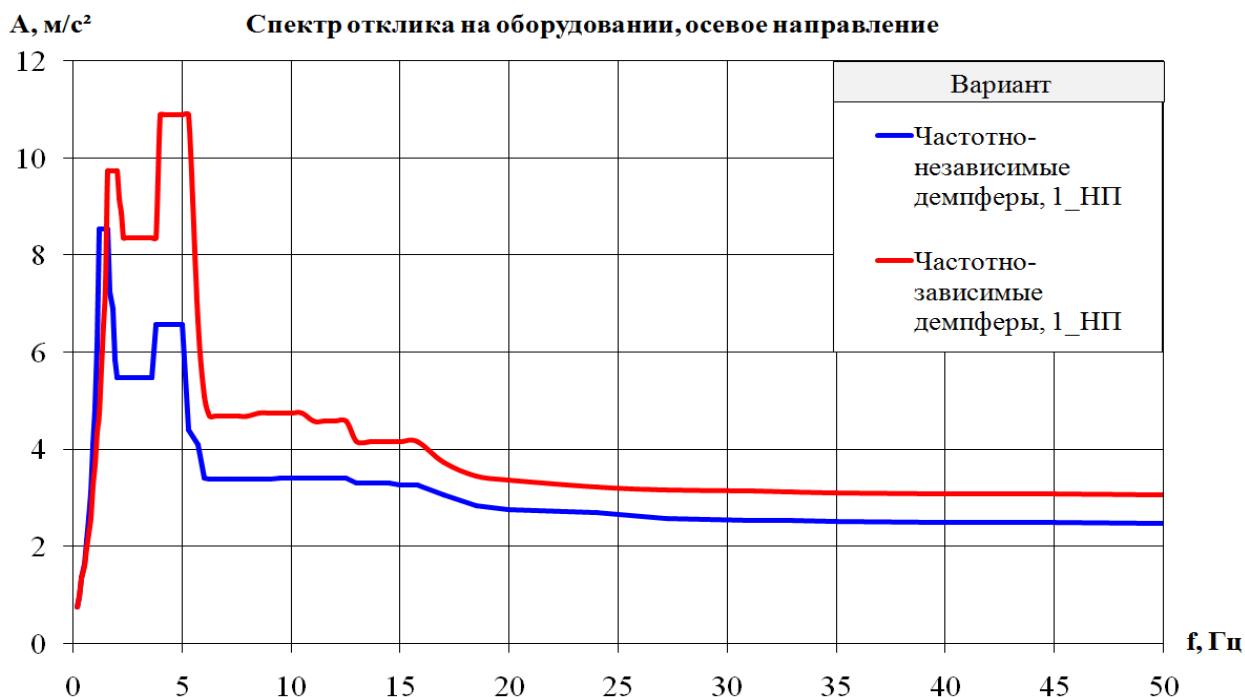


Рисунок 10 – Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 10 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 6 – Максимальные сейсмические деформации изоляторов, взаимные смещения фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания

Table 6 – Maximum seismic deformations of insulators, mutual displacements of the turbine foundation and service mark structures

	Частотно независимые	Частотно-зависимые
Виброизолятор под конденсатором	13.6	7.6
Виброизолятор под ФТА	42.5	29.1
ФТА-отметка обслуживания	46.0	30.9

Учёт частотной зависимости жёсткости в демпфере, и учёт жёсткости демпфера как таковой приводит к росту частоты основной формы колебаний фундамента турбоагрегата в осевом направлении, что в свою очередь приводит к росту максимальных сейсмических ускорений на отметке установки турбоагрегата на 30-60%. В тоже время, учёт частотной зависимости затухания в демпферах снижает величину максимальных сейсмических деформаций изоляторов на 30-40%.

Таким образом, при расчёте виброизолированных фундаментов турбоагрегатов на сейсмическое воздействие, необходим учёт частотной зависимости динамических характеристик вязкоупругих демпферов. В случае игнорирования частотной зависимости демпферов и упрощения в расчётной модели демпферов до идеально-вязких элементов возможно получение ошибочных на 20-60% результатов в неконсервативную сторону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании и сейсмических расчётах виброизолированных фундаментов турбоагрегатов рекомендуется:

- учитывать демпфирование в грунтах основания ограничивая его величину в случае получения околокритических и критических значений;
- на начальных этапах проектирования детально исследовать частотный состав исходного сейсмического воздействия, особое внимание обратить на диапазон частот от 1 до 4 Гц - частот основных форм колебаний виброизолированных фундаментов турбоагрегатов;
- для повышения сейсмоизолирующей эффективности виброизоляцию ФТА предусматривать из «мягких» пружинных изоляторов с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей в диапазоне от 1 к 5 до 1 к 6;
- проводить сейсмические расчёты виброизолированных фундаментов в составе здания турбины методом прямого интегрирования уравнений движения
- при проведении сейсмических расчётов виброизолированных фундаментов обязательно учитывать частотные зависимости величин жёсткости и затухания в вязких демпферах.

Список литературы

1. НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций, 2001.
2. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах, 2018.
3. Тарасов В.А., и др. Системы сейсмоизоляции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №4 (43). С. 117-140.
4. Тарасов В.А. Обеспечение сейсмостойкости виброизолированного фундамента турбоагрегата // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 44-47.
5. 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. doi: 10.22363/1815-5235-2021-17-1-30-41
6. MSC/NASTRAN. Linear Static/Dynamic Analysis, User Guide, Version 70, the Mac Neal Schwendler Corporation, Los Angeles, California, 1998.
7. Kostarev V., Berkovski A., et. al. Application of mathematical model for high viscous damper to dynamic analysis of NPP piping // Proc. of 10th ECEE, 1994, Vienna, Austria.
8. Kostarev V.V., Vasilyev P.S., Nawrotzki P., A new approach in seismic base isolation and dynamic control of structures, Transactions of the NZSEE Annual Technical Conference and 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, 2017, Auckland, NZ.
9. ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016.

References

1. NP-031-01 Normy proektirovaniya sejsmostojkih atomnyh stancij, 2001. (rus)
2. SP 14.13330.2018 Seismic building design code, 2018. (rus)
3. Tarasov V.A., and etc. Sistemy seysmoizolyatsii [Seismic isolation systems]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2016. No43(4). Pp. 117-140. (rus)
4. Tarasov V. Ensuring seismic stability of the vibration-insulated foundation of the turbine unit. Natural and Technological Risks. Building Safety. 2020; 1: 44-47. (rus)
5. Babsky A.E., Lalin V.V., Oleinikov I.I., Tarasov V.A. Seismic stability of vibrationinsulated turbine foundations depending on the frequency composition of seismic

impact. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2021;17(1): 30-41. (rus) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-1-30-41>

6. MSC/NASTRAN. Linear Static/Dynamic Analysis, User Guide, Version 70, the Mac Neal Schwendler Corporation, Los Angeles, California, 1998.

7. Kostarev V., Berkovski A., et. al. Application of mathematical model for high viscous damper to dynamic analysis of NPP piping // Proc. of 10th ECEE, 1994, Vienna, Austria.

8. Kostarev V.V., Vasilyev P.S., Nawrotzki P., A new approach in seismic base isolation and dynamic control of structures, Transactions of the NZSEE Annual Technical Conference and 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, 2017, Auckland, NZ.

9. ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016.

Информация об авторах/Information about authors

Бабский Александр Евгеньевич, главный специалист по динамике сооружений, строительный отдел – турбинный остров, Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-Петербургский проектный институт»; eLIBRARY SPIN-код: 9620-8675, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8297-1630>

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

Тарасов Владимир Александрович, инженер-проектировщик, строительный отдел – турбинный остров, Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-Петербургский проектный институт»; аспирант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; eLIBRARY SPIN-код: 9264-3744, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>.

Vladimir A. Tarasov, JSC Atomenergoproekt St. Petersburg Branch - St. Petersburg Design Institute; graduate student of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Institute of Civil Engineering, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University; eLIBRARY SPIN-code: 9264-3744, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>

УДК 624.953

DOI [10.37153/2618-9283-2021-5-50-63](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-50-63)

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Реализация принципов сейсмоизоляции для эффективной сейсмозащиты нефтегазовых сооружений

Белаш Татьяна Александровна¹, Дымов Евгений Антонович²

^{1,2} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: На сегодняшний день в мировой практике сейсмостойкого строительства существует достаточно большое количество сведений о разрушениях резервуаров для хранения нефтегазовых продуктов. Для защиты таких сооружений за рубежом предлагается использование специальных средств сейсмозащиты, которые позволяют уменьшить разрушение конструкций резервуаров и сохранить хранимое в них топливо. Однако на территории России данные способы сейсмозащиты еще не получили широкого распространения. В статье представлено исследование вопросов применения сейсмоизоляции резервуаров для нефтегазовых продуктов в сейсмически активных районах.

Ключевые слова: Сейсмозащита резервуаров, нефтяной резервуар, газгольдер, сейсмоизоляционные опоры

Для цитирования: Белаш Т.А., Дымов Е.А. Реализация принципов сейсмоизоляции для эффективной сейсмозащиты нефтегазовых сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С.50-63.

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-50-63](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-50-63)

Seismic safety and seismic isolation of buildings

Implementation of the principles of seismic isolation for effective seismic protection of oil and gas facilities

Belash Tatiana Alexandrovna¹, Dymov Evgenii Antonovich²

^{1,2} Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract: Today, in the world practice of earthquake-resistant construction, there is a fairly large amount of information about the destruction of reservoirs for storing oil and gas products. To protect such structures abroad, it is proposed to use special means of seismic protection, which make it possible to reduce the destruction of tank structures and preserve the fuel stored in them. However, on the territory of Russia, these methods of seismic protection have not yet become widespread. This report presents research on the application of seismic isolation of reservoirs for oil and gas products in seismically active regions.

@ Белаш Т.А., Дымов Е.А., 2021

Keywords: Seismic protection of tanks, oil tank, gas tank, seismic isolation supports

For citation: Belash T. A., Dymov E.A. Implementation of the principles of seismic isolation for effective seismic protection of oil and gas facilities. *Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* = *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 50-63. (In Russian) DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-50-63](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-50-63)

Нефтегазовую промышленность можно считать одной из главных отраслей топливно-энергетического комплекса, оказывающей существенное влияние на экономику страны. Она тесно связана со многими отраслями промышленности. За последние годы ежегодная добыча нефти на территории России составляет более 500 млн тонн, а добыча природного газа более 700 млрд м³ [1], транспортировка этого сырья осуществляется по трубопроводам к местам его потребления, а хранение происходит в специальных емкостных сооружениях. Для хранения нефтяных продуктов используют резервуары, а для хранения различных газов – газгольдеры. Эти сооружения обеспечивают непрерывную работу энергетических, химических, нефтегазовых, гидротехнических объектов и других предприятий. Резервуары для хранения нефтегазовых продуктов имеют повышенный уровень ответственности и являются особо опасными и технически сложными объектами. Неправильная их эксплуатация может вызвать серьезные аварии, которые влекут за собой угрозу жизни и здоровью людей, материальные убытки и серьезные экологические катастрофы. При проектировании и эксплуатации таких сооружений следует учитывать особые условия района, среди которых могут быть просадочные грунты, вечная мерзлота и сейсмическая активность.

Как известно на территории России встречаются сейсмоопасные зоны, в которых интенсивность землетрясений может достигать более 8 баллов [2]. Такие природные воздействия сильно сказываются на безаварийной эксплуатации резервуаров и безопасном хранении нефтегазовых продуктов, нарушение работы которых может привести к крупным авариям. Большое количество аварий, произошедших на нефтегазовых предприятиях при землетрясениях, подтверждают значимость данного вопроса. Поэтому защита емкостных сооружений во время сейсмической активности является одним из важных вопросов с точки зрения сейсмостойкого строительства.

Резервуары для хранения нефти и газа имеют большое количество конструктивных решений [3, 4], которые учитывают тип хранимого топлива, его количество, температуру и давление. В зависимости от этих параметров сооружения имеют различные конструктивные особенности. В данной статье рассматривается небольшая часть таких резервуаров, а именно стальные цилиндрические резервуары для хранения жидких нефтепродуктов и изотермические газгольдеры для хранения сжиженного природного газа (СПГ).

Цилиндрические резервуары для хранения нефти по конструктивным особенностям разделяют на [5]:

- резервуар со стационарной крышей без понтона (РВС) (рис.1, а);
- резервуар со стационарной крышей с понтоном (РВСП) (рис.1, б);
- резервуар с плавающей крышей (РВСПК) (рис. 1, в).

Эти сооружения предназначены для хранения топлива объемом от 100 до 120000

м³.

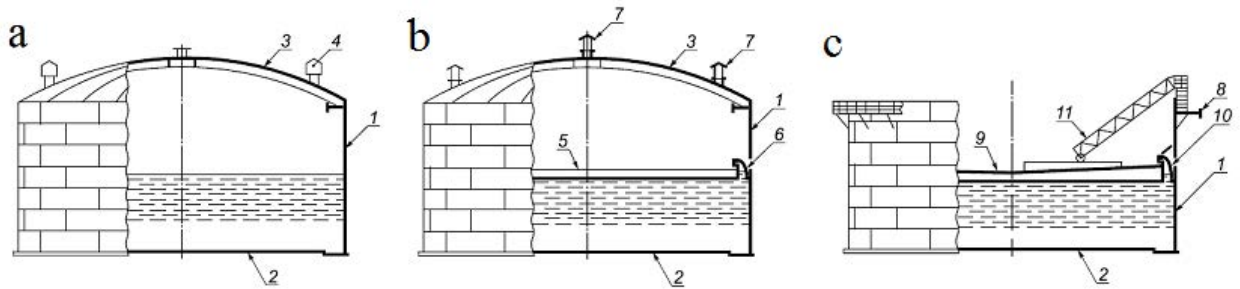


Рисунок 1 – Схемы стальных цилиндрических резервуаров [5]:

а – резервуар со стационарной крышей без понтона; б – резервуар со стационарной крышей с понтоном; в – резервуар с плавающей крышей

Figure 1 – Diagrams of steel cylindrical tanks [5]:

а – a tank with a fixed roof without a pontoon; б – a tank with a fixed roof with a pontoon; в – a tank with a floating roof;

1 – wall; 2 – bottom; 3 – fixed roof; 4 – breathing valve; 5 – pontoon; 6 – sealing gate;
7 – ventilation opening; 8 – wind ring; 9 – floating roof; 10 – sealing gate with weatherproof visor; 11 – rolling ladder

Изотермические газгольдеры предназначены для хранения газов под низкими отрицательными температурами, это позволяет сжать газ примерно в 600 раз [6]. Их конструкции представляют сложную многослойную систему, включающую в себя первичный резервуар, теплоизоляцию и вторичный резервуар. Различают несколько типов таких резервуаров, различающихся материалом и количеством оболочек, один из которых представлен на рисунке 2 [7, 8].

Землетрясения различной силы и интенсивности могут привести к частичным или полным разрушениям конструкций резервуаров. Наиболее типичными повреждениями цилиндрических резервуаров являются:

- смятие стенки резервуара;
- разрушение стенки резервуара;
- разрушение крыши резервуара;
- разрушение днища резервуара;
- сдвиг и опрокидывание резервуара;
- разрушение анкерных креплений.

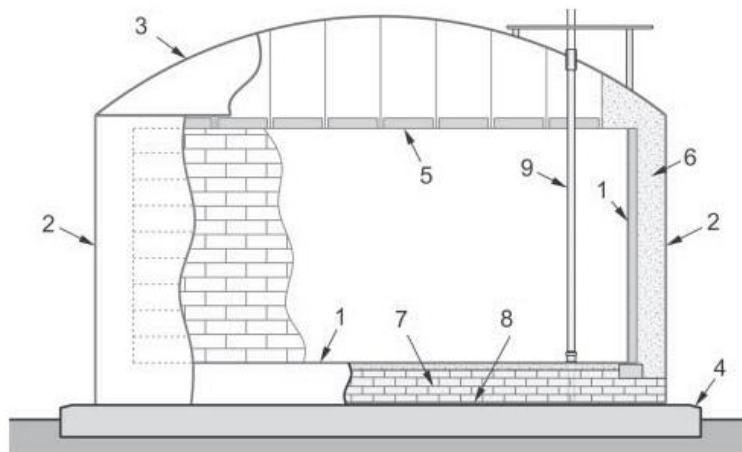


Рисунок 2 – Схема газгольдера для СПГ закрытого типа [7]:
1 – первичный металлический (9 % Ni) контейнер; 2 – вторичный стальной контейнер;
3 – крыша с пароизоляцией (низкотемпературная сталь); 4 – бетонный фундамент;
5 – подвесная крыша с изоляцией; 6 – перлитовая изоляция (межстенное пространство);
7 – утеплитель (пеностекло); 8 – днище первого контейнера (низкотемпературная сталь);
9 – насосная колонна

Figure 2 – Diagram of a closed-type LNG gas tank [7]:
1 – primary metal (9% Ni) container; 2 – secondary steel container; 3 – roof with vapor barrier (low-temperature steel); 4 – concrete foundation; 5 – suspended roof with insulation;
6 – perlite insulation (inter-wall space); 7 – insulation (foam glass); 8 – bottom of the first container (low-temperature steel); 9 – pump column

При высокочастотном землетрясении может возникнуть два типа деформации стенки резервуара – «ромбовая» деформация и «слоновья нога». «Ромбовая» деформация возникает при малом кольцевом напряжении и сильном вертикальном, которое вызвано опрокидывающим моментом и другими вертикальными нагрузками. Стенка резервуара изгибается внутрь и возникают складки по её окружности (рис. 3). Этот вид деформации встречается в резервуарах с большим отношением высоты к радиусу [9].



Рисунок 3 – «Ромбовая» деформация небольшого резервуара. Кобе, Япония, 1995 г. [10]

Figure 3 – "Diamond" deformation of a small tank. Kobe, Japan, 1995 [10]

Деформация «слоновьей нога» в резервуарах цилиндрической формы проявляется в опорной части (рис. 4). При действии сейсмической нагрузки на сооружение возникает опрокидывающий момент. С одной стороны сооружения происходит потеря устойчивости нижнего пояса стенки резервуара за счет сжатия боковой стенки о днище. А с другой стороны сооружения происходит отрыв днища и срыв анкерных креплений [10-15].

В более критических случаях при сильных пластических деформациях может произойти разрушение уторного шва резервуара и начаться разлив топлива, при этом возрастает риск его возгорания. В качестве примера возможных последствий такого разрушения можно привести аварию, произошедшую в Норильске в мае 2020 года. Разрушение резервуара и разлив топлива произошли не вследствие сейсмических воздействий, однако и при землетрясениях возможны похожие повреждения.

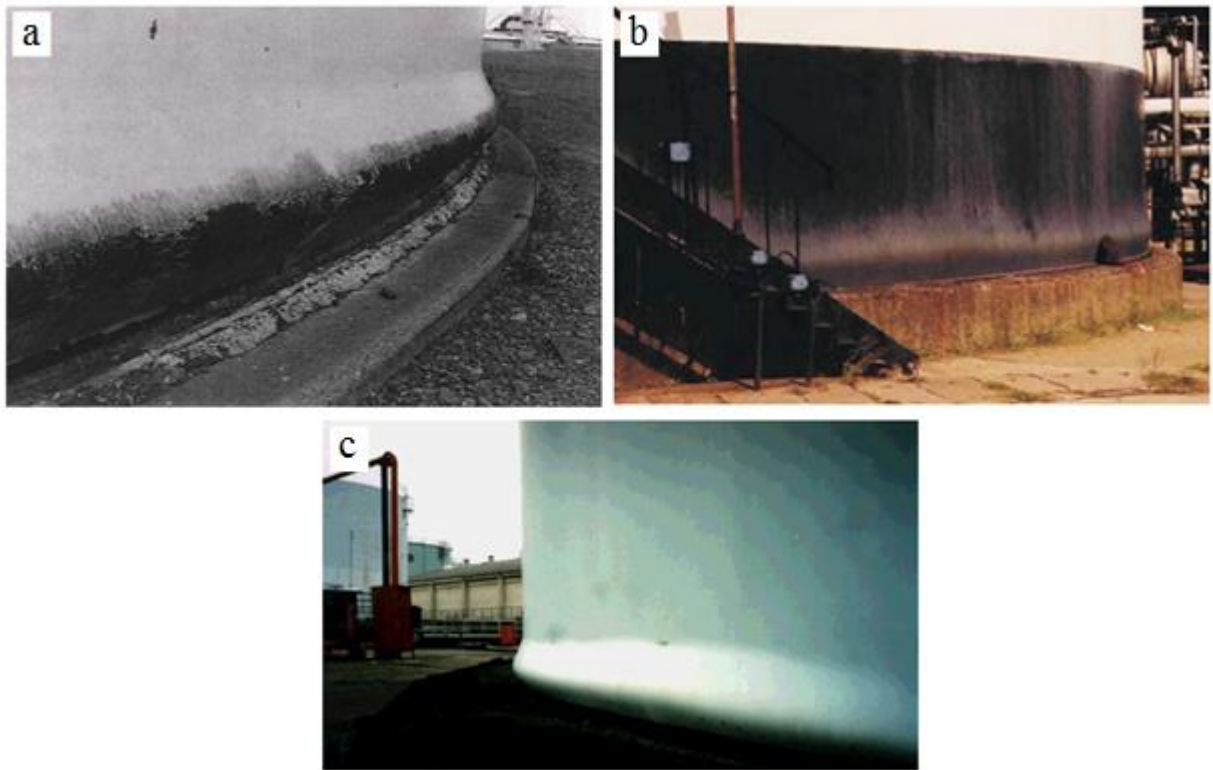


Рисунок 4 – Деформация стенки резервуара «слоновьей нога» [10, 12, 13]:
а – Землетрясение Лома-Приета в Сан-Франциско, США, 1989 г.; б – Коджаэли, Турция, 1999 г.; в – Кобе, Япония, 1995 г.

Figure 4 – Deformation of the wall of the elephant's foot reservoir [10, 12, 13]:
а – The Loma Prieta earthquake in San Francisco, USA, 1989; б – Kocaeli, Turkey, 1999;
с – Kobe, Japan, 1995

При низкочастотном землетрясении может произойти всплеск жидкости в резервуаре. В резервуарах со стационарной крышей волна жидкости может достигнуть уровня крыши, в этом случае в соединении крыши и стенки резервуара увеличивается внутреннее давление и происходит изгиб. В этот момент увеличивается избыточное давление газа из-за воспламеняющихся паров легковоспламеняющейся жидкости (рис. 5) [10].



Рисунок 5 – Сгоревший резервуар со стационарной крышей. Коджаэли, Турция, 1999 г.
[16]

Figure 5 – A burnt-out tank with a fixed roof. Kocaeli, Turkey, 1999 [16]

В резервуарах с плавающей крышей при низкочастотных землетрясениях может произойти деформация и разрушение крыши из-за волны жидкости. Возгорание топлива происходит от искр, возникающих из-за трения конструкций плавающей крыши и стенок резервуара. Воспламенение всего топлива может произойти в случае, если плавающая крыша полностью разрушена и погрузилась на дно резервуара (рис. 6). Тушение таких пожаров не всегда бывает эффективным, тушение происходит, когда топливо полностью сгорает, это занимает несколько дней [10].

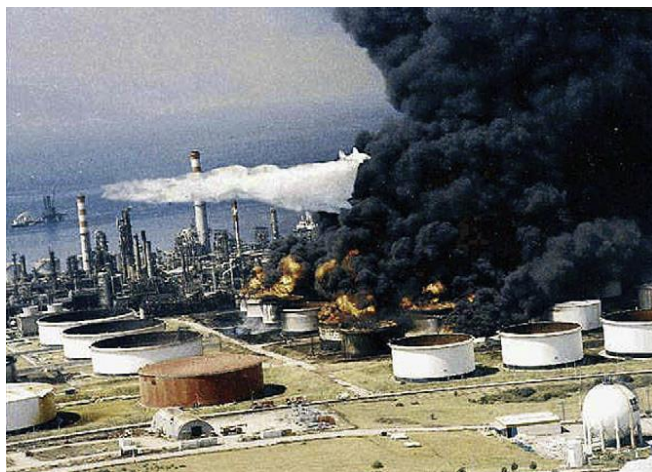


Рисунок 6 – Пожар в резервуарном парке после землетрясения. Коджаэли, Турция, 1999 г.
[17]

Figure 6 – Fire in the tank farm after an earthquake. Kocaeli, Turkey, 1999 [17]

Зачастую резервуарные парки строятся в прибрежной зоне, где организуют терминалы приема нефти. В таких зонах в сейсмически активных районах возможно появление цунами. Если резервуар частично заполнен или полностью пустой, цунами может смыть его с фундамента. Полный резервуар волна не смывает, однако сильно повредит его корпус.

Данных о разрушениях резервуаров от цунами на сегодняшний день немного, однако крупные цунами в Японии в 2011 году и на Аляске в 1964 году дают возможность получить больше информации о возможных разрушениях конструкций резервуаров.

В Японии из-за большого цунами и площади затопления произошли разрушения резервуаров за счет гидродинамических сил воды и размыва фундамента (рис. 7) [10]. Действие воды привело к смытию и перемещению резервуаров, а также разрыву трубопроводов, вследствие этого произошел разлив топлива и пожар (рис. 8-9).

На Аляске в Уиттере во время Великого Аляскинского землетрясения произошло возгорание резервуаров из-за действия цунами (рис. 10).

Вопросам обеспечения сейсмостойкости объектов нефтегазового комплекса на сегодняшний день посвящено значительное количество исследований [20-25]. Зарубежная практика сейсмостойкого строительства показывает, что использование специальных средств сейсмозащиты позволяет значительно уменьшить риски повреждений не только объектов гражданского назначения, но и промышленного, таких как резервуары. Однако в России практически отсутствуют проекты сейсмоизолированных емкостных сооружений в виду отсутствия нормативных рекомендаций. При значительном количестве исследований, посвященных этой тематике, вопросы использования сейсмоизоляции до настоящего времени недостаточно изучены и реализуются лишь на предпроектных уровнях.

Для оценки эффективности принципов сейсмоизоляции были проведены расчетно-теоретические исследования в программно-вычислительном комплексе (ПВК) SCAD. Исследования проводились на простейших моделях резервуаров, спроектированных с помощью плоских конечных элементов. Были выбраны резервуары для хранения СПГ и нефти.

Газгольдер для хранения СПГ запроектирован в виде цилиндрического резервуара (рис. 11), внешняя оболочка которого выполнена из железобетона толщиной 1 м, высотой 48 м и диаметром 86 м. Внутренняя емкость выполнена из никелевой стали толщиной 16 мм. Фундамент запроектирован в виде свайного поля.

Резервуар для хранения нефти – цилиндрический резервуар со стационарной крышей без понтона объемом 5000 м³ (рис. 12). Стенки резервуара выполнены из металлических листов толщиной 10 мм, диаметр сооружения составляет 22,8 м, а высота стенок 12 м. Фундаменты в виде свайного поля.



Рисунок 7 – Опрокинутый цунами резервуар. Япония, 2011 г. [10]

Figure 7 – Overturned tsunami reservoir. Japan, 2011 [10]



Рисунок 8 – Резервуар, разрушенный цунами. Япония, 2011 г. [18]

Figure 8 – A reservoir destroyed by a tsunami. Japan, 2011 [18]



Рисунок 9 – Сгоревшие резервуары после цунами. Япония, 2011 г. [18]

Figure 9 – Burnt tanks after the tsunami. Japan, 2011 [18]



Рисунок 10 – Горящие резервуары. Уиттер, Аляска. 1964 г. [19]

Figure 10 – Burning tanks. Witter, Alaska. 1964 [19]

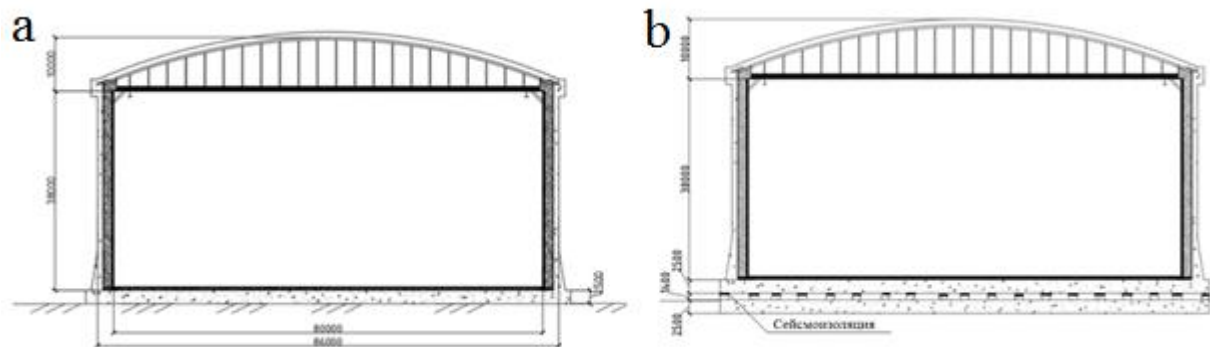


Рисунок 11 – Схема газгольдера для хранения СПГ: а – без сейсмоизоляции; б – с сейсмоизоляцией

Figure 11 – Scheme of a gas tank for LNG storage: a – without seismic isolation; b – with seismic isolation

В качестве сейсмоизоляции были выбраны резинометаллические опоры, характеристики которых принимались по каталогу компании FIP Industriale и задавались в программе с помощью функции «Ввод упругой связи». Характеристики резинометаллических опор представлены в таблице 1.

В расчете учтены различные сочетания нагрузок, однако были приняты некоторые допущения – не учитывалось влияние грунта, свайное поле задавалось жесткими связями, топливо учитывалось в виде гидростатической нагрузки и возможный его всплеск не учитывался. Результаты расчета сведены в таблицы 2-4.

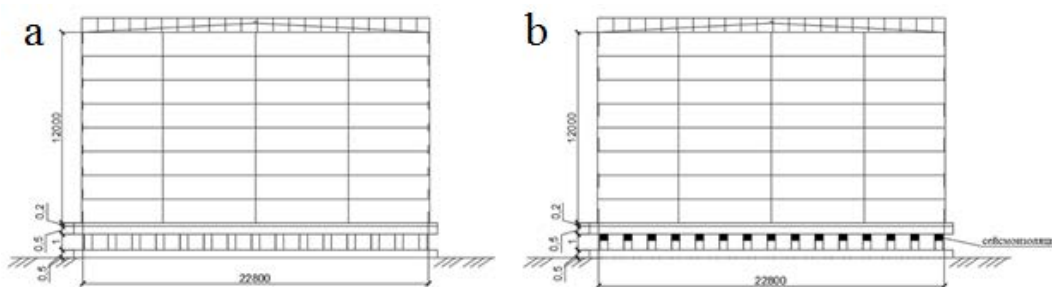


Рисунок 12 – Схема резервуара для нефти:
 а – без сейсмоизоляции; б – с сейсмоизоляцией

Figure 12 – The scheme of the oil tank:
 a - without seismic isolation; b - with seismic isolation

Таблица 1 – Характеристики опор

Table 1 – Characteristics of the supports

Маркировка опоры	Эффективная горизонтальная жесткость, т/м	Вертикальная жесткость, т/м	Применение
LRB-SN 1200/209-215	497	468500	Газгольдер для СПГ
LRB-SN 600/102-120	255	209100	Резервуар для нефти

Таблица 2 – Перемещения элементов газгольдера СПГ

Table 2 – Movements of LNG gas tank elements

Оси	Значения перемещений							
	Перемещения в верхней части стенки, мм							
	С сейсмоизоляцией				Без сейсмоизоляции			
X	-264,24	-263,57	-264,22	-262,02	-13,54	-10,68	-13,56	-10,89
Y	-187,53	-187,54	-185,88	-187,55	2,86	3,95	2,78	3,69
Оси	Перемещения в нижней части стенки, мм							
	С сейсмоизоляцией				Без сейсмоизоляции			
	X	-225,52	-229,12	-225,7	-227,54	-2,31	-3,69	-2,37
Y	-162,8	-160,86	-161,42	-160,51	0,67	0,49	0,55	0,61

Таблица 3 – Перемещения элементов резервуара для нефти

Table 3 – Movements of elements of the oil tank

Оси	Значения перемещений							
	Перемещения в верхней части стенки, мм							
	С сейсмоизоляцией				Без сейсмоизоляции			
X	-224,35	-224,19	-224,34	-224,18	-113,14	-112,99	-113,14	-112,99
Y	3,37	3,38	3,37	3,38	0,93	0,93	0,93	0,93
	Перемещения в нижней части стенки, мм							
	С сейсмоизоляцией				Без сейсмоизоляции			
	X	-110,09	-110,1	-110,09	-110,09	-9,99	-9,99	-9,99
Y	1,65	1,66	1,66	1,66	0,08	0,08	0,08	0,08

Таблица 4 – Значения внутренних напряжений

Table 4 – Values of internal stresses

Резервуар	Параметр	С сейсмоизоляцией	Без сейсмоизоляции
Газгольдер для СПГ	$N_{max}, T/m^2$	1428,86	6977,43
	$N_{min}, T/m^2$	-1755,91	-7946,82
Резервуар для нефти	$N_{max}, T/m^2$	577,85	619,86
	$N_{min}, T/m^2$	-671,59	-708,32

Расчетный анализ показывает, что использование сейсмоизоляции позволяет снизить внутренние напряжения в конструкциях, однако ее применение значительно увеличивает перемещения в конструкциях резервуаров.

Заключение

При проектировании и эксплуатации резервуаров следует учитывать особые условия района, среди которых наиболее опасными являются сейсмические нагрузки. Землетрясения различной силы и интенсивности могут привести к частичным или полным разрушениям конструкции резервуаров.

Частотный характер землетрясения влияет на поведение резервуара.

При высокочастотном землетрясении основная нагрузка приходится на корпус сооружения, вследствие чего возникает опрокидывающий момент и происходит деформация стенок резервуара.

При низкочастотных землетрясениях из-за действия горизонтальных воздействий топливо в резервуаре начинает раскачиваться. Волна может повредить внутренние конструкции резервуаров, из-за чего возникает пожар, ликвидация которого может занять несколько дней.

Выполненные исследования показали, что использование специальных средств сейсмозащиты позволяет обеспечить сейсмостойкость рассматриваемых сооружений. При этом кроме гибких опор должны быть включены элементы ограничения опасных перемещений, которые возникают при низкочастотных сейсмических воздействиях.

Список литературы

1. Enerdata: Статистический ежегодник мировой энергетики 2020. URL: <https://yearbook.enerdata.ru/natural-gas/world-natural-gas-production-statistics.html>.
2. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах: Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Москва, Стандартинформ. 2018. 122 с.
3. Веревкин С.И., Корчагин В. А. Газгольдеры. Москва: Издательство литературы по строительству. 1966. 239 с.
4. Едигаров С.Г., Бобровский С.А. Проектирование и эксплуатация нефтебаз и заохранилищ. М., «Недра». 1973, 180 с.
5. ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Москва, Стандартинформ. 2016. 98 с.
6. Костюков В., Шкода С. Разновидности газового топлива и их основные характеристики // Сфера. Нефть и газ. 2017. № 58. С. 58-66.
7. Rötzer J. Design and Construction of LNG Storage Tanks. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2020. 122 p.
8. Yang Y., Kim J., Seo H. Development of the world's largest above-ground full containment LNG storage tank. 23rd World Gas Conference. Amsterdam, 2006, pp. 1-14.
9. Saha S.K., Matsagar V.A. (2015) Reliability of Base-Isolated Liquid Storage Tanks under Horizontal Base Excitation. In: Kadry S., El Hami A. (eds) Numerical Methods for Reliability and Safety Assessment. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07167-1_10
10. S. Yoshida, "Earthquake Damages and Disaster Prevention of Aboveground Storage Tanks", EPI International Journal of Engineering, vol. 1, no. 2, pp. 87-93, Nov. 2018
11. СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Москва: Ростехэкспертиза. 2009. 61 с.
12. D. Whittaker. Seismic design of storage tanks, 2009: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2009. 177 p.
13. Rotter, J. M. (2006). Elephant's foot buckling in pressurised cylindrical shells. Stahlbau, 75(9), 742–747. doi:10.1002/stab.200610079
14. Malhotra, P. K., Wenk, T., & Wieland, M. (2000). Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks. Structural Engineering International, 10(3), 197–201. doi:10.2749/101686600780481509
15. Шигапов Р.Р., Ковальчук О.А. Обзор характерных аварий вертикальных цилиндрических резервуаров в результате землетрясений. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. №1. С. 14-19.
16. Manser, W. S., Touati, M., & Barros, R. C. (2017). The maximum sloshing wave height evaluation in cylindrical metallic tanks by numerical means. MATEC Web of Conferences, 95, 17005. doi:10.1051/mateconf/20179517005
17. Korkmaz, K. A., Sari, A., & Carhoglu, A. I. (2011). Seismic risk assessment of storage tanks in Turkish industrial facilities. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24(4), 314–320. doi:10.1016/j.jlp.2011.01.003
18. Krausmann, E., & Cruz, A. M. (2013). Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. Natural Hazards, 67(2), 811–828. doi:10.1007/s11069-013-0607-0
19. The Atlantic. 1964: Alaska's Good Friday Earthquake URL: <https://www.theatlantic.com/photo/2014/05/1964-alaskas-good-friday-earthquake/100746/>

20. Stefano Barone, Mauro Sartori. Seismic isolation of LNG storage tanks in Italy with curved surface sliders. Conference: 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE. Sendai, Japan. 2020.
21. Saha, S., Matsagar, V. and Jain, A. (2013) Comparison of base-isolated liquid storage tank models under bi-directional earthquakes. *Natural Science*, 5, 27-37. doi: 10.4236/ns.2013.58A1004.
22. Baumann, T., & Böhrer, J. (2001). Seismic Design for Base-Isolated LNG-Storage-Tanks. *Structural Engineering International*, 11(2), 139–144. doi:10.2749/101686601780347165
23. Alhan, C, Gazi, H, Guler, E. Influence of isolation system characteristic strength on the earthquake behavior of base-isolated liquid storage tanks. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2018. 25(4):346-352.
24. Zhou, Y., Li, X., & Chen, Z. (2018). Seismic Responses Analysis of Base-Isolated LNG Storage Tank. *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*, 331–339. doi:10.1007/978-981-13-0131-5_36
25. Nikomanesh, M. R., Moeini, M., & Goudarzi, M. A. (2019). An innovative isolation system for improving the seismic behaviour of liquid storage tanks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. doi:10.1016/j.ijpvp.2019.04.012

References

1. Enerdata: Statistical Yearbook of World Energy 2020. URL: <https://yearbook.enerdata.ru/natural-gas/world-natural-gas-production-statistics.html>.
2. SP 14.13330.2018. Stroitelstvo v seismicheskikh raionakh: Aktualizirovannaya redaktsiia SNiP II s-7-81* [Construction in seismic areas: Updated version of SNiP II with-7-81*] . Moscow, Standartinform, 2018. 122 p.
3. Verevkin S.I., Korchagin V. A. Gazgoldery [Gas tanks]. Moscow: Publishing House of Literature on Construction, 1966. 239 p.
4. Edigarov S.G., Bobrovsky S.A. Proektirovanie i ekspluatatsiia neftebaz i zazokhranilishch [Design and operation of oil depots and storage facilities]. M., "Nedra", 1973, 180 p.
5. GOST 31385-2016. Rezervuary vertikalnye tsilindricheskie stalnye dlia nefti i nefteproduktov. Obshchie tekhnicheskie usloviia [Vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products. General technical conditions]. Moscow, Standartinform, 2016. 98 p.
6. Kostyukov V., Skoda S. Raznovidnosti gazovogo topliva i ikh osnovnye kharakteristiki [Varieties of gas fuel and their main characteristics] // Sphere. Oil And Gas. 2017. No. 58. Pp. 58-66
7. Rötzer J. Design and Construction of LNG Storage Tanks. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2020. 122 p.
8. Yang Y., Kim J., Seo H. Development of the world's largest above-ground full containment LNG storage tank. – 23rd World Gas Conference. Amsterdam, 2006, pp. 1-14.
9. Saha S.K., Matsagar V.A. (2015) Reliability of Base-Isolated Liquid Storage Tanks under Horizontal Base Excitation. In: Kadry S., El Hami A. (eds) Numerical Methods for Reliability and Safety Assessment. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07167-1_10
10. S. Yoshida, "Earthquake Damages and Disaster Prevention of Aboveground Storage Tanks", *EPI International Journal of Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 87-93, Nov. 2018
11. STO-SA-03-002-2009 . Pravila proektirovaniia, izgotovleniia i montazha vertikalnykh tsilindricheskikh stalnykh rezervuarov dlia nefti i nefteproduktov [Rules for the design, manufacture and installation of vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products]. Moscow: Rostekhpertiza, 2009. 61 p.

12. D. Whittaker. Seismic design of storage tanks, 2009 : New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2009. 177 p.
13. Rotter, J. M. (2006). Elephant's foot buckling in pressurised cylindrical shells. *Stahlbau*, 75(9), 742–747. doi:10.1002/stab.200610079
14. Malhotra, P. K., Wenk, T., & Wieland, M. (2000). Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks. *Structural Engineering International*, 10(3), 197–201. doi:10.2749/101686600780481509
15. Shigapov R.R., Kovalchuk O.A. Obzor kharakternykh avarii vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov v rezultate zemletriasenii. Seismostoiкое stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenii [Review of characteristic accidents of vertical cylindrical reservoirs as a result of earthquakes]. *Earthquake engineering. Construction safety*. 2018, no. 1, pp. 14-19.
16. Manser, W. S., Touati, M., & Barros, R. C. (2017). The maximum sloshing wave height evaluation in cylindrical metallic tanks by numerical means. *MATEC Web of Conferences*, 95, 17005. doi:10.1051/mateconf/20179517005
17. Korkmaz, K. A., Sari, A., & Carhoglu, A. I. (2011). Seismic risk assessment of storage tanks in Turkish industrial facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(4), 314–320. doi:10.1016/j.jlp.2011.01.003
18. Krausmann, E., & Cruz, A. M. (2013). Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. *Natural Hazards*, 67(2), 811–828. doi:10.1007/s11069-013-0607-0
19. The Atlantic. 1964: Alaska's Good Friday Earthquake URL: <https://www.theatlantic.com/photo/2014/05/1964-alaskas-good-friday-earthquake/100746/>
20. Stefano Barone, Mauro Sartori. Seismic isolation of LNG storage tanks in Italy with curved surface sliders. Conference: 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE. Sendai, Japan. 2020.
21. Saha, S., Matsagar, V. and Jain, A. (2013) Comparison of base-isolated liquid storage tank models under bi-directional earthquakes. *Natural Science*, 5, 27-37. doi: 10.4236/ns.2013.58A1004.
22. Baumann, T., & Böhrer, J. (2001). Seismic Design for Base-Isolated LNG-Storage-Tanks. *Structural Engineering International*, 11(2), 139–144. doi:10.2749/101686601780347165
23. Alhan, C, Gazi, H, Guler, E. Influence of isolation system characteristic strength on the earthquake behavior of base-isolated liquid storage tanks. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2018. 25(4):346-352.
24. Zhou, Y., Li, X., & Chen, Z. (2018). Seismic Responses Analysis of Base-Isolated LNG Storage Tank. *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*, 331–339. doi:10.1007/978-981-13-0131-5_36
25. Nikomanesh, M. R., Moeini, M., & Goudarzi, M. A. (2019). An innovative isolation system for improving the seismic behaviour of liquid storage tanks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. doi:10.1016/j.ijpvp.2019.04.012

Информация об авторах / Information about authors

Белаш Татьяна Александровна, д.т.н., профессор. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Tatiana A. Belash, D.Sc. (Technology), Professor. Saint-Petersburg, Russian Federation

Дымов Евгений Антонович, аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Evgenii A. Dymov, Postgraduate at the Department of «Building structures, buildings and structures», Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

УДК 69.07

DOI [10.37153/2618-9283-2021-5-64-72](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-64-72)

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Перспективное использование конструктивных систем зданий подвешенного типа в сейсмических районах

Белаш Татьяна Александровна¹, Свитлик Илья Владимирович²

^{1,2} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: Подходы к обеспечению устойчивости высотных зданий к сейсмическим воздействиям отличаются своим многообразием. Среди них стоит выделить использование подвесных конструкций. Подобный подход позволяет снизить нагрузки в несущих конструкциях, вызванные динамическими воздействиями. Эффективность применения подвесных конструкций в сейсмостойком строительстве подтверждалась исследованиями поведения подобных объектов в условиях землетрясений. Развитие вычислительных комплексов в свою очередь позволило раскрыть потенциал использования подвесных конструкций в сейсмически опасных районах. Однако инженерное сообщество всё ещё не пришло к однозначному решению проблемы значительных смещений подвешенных перекрытий при низкочастотных сейсмических воздействиях. Вопрос по обеспечению устойчивости конструкций ядра здания также остаётся открытым. Предложения по решению данных проблем, как и сами несущие конструкции высотных зданий подвешенного типа, отличаются многообразием. В этой статье рассматриваются основные существующие и перспективные конструктивные решения, обеспечивающие сейсмостойкость высотных зданий с подвесными конструкциями. Результаты расчётных исследований данных конструктивных решений приведены в статье.

Ключевые слова: высотные здания, подвесные конструкции, сейсмическое воздействие

Для цитирования: Белаш Т.А., Свитлик И.В. Перспективное использование конструктивных систем зданий подвешенного типа в сейсмических районах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С.64-72.

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-64-72](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-64-72)

Seismic safety and seismic isolation of buildings

Prospects for the use of structural systems of suspended buildings in seismic areas

Belash Tatiana Aleksandrovna¹, Svitlik Iliia Vladimirovich²

^{1,2} Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract: There are many approaches to ensuring the stability of high-rise buildings to seismic impacts. Among them, it is worth noting the use of suspended structures. This approach makes it

@ Белаш Т.А., Дымов Е.А., 2021

possible to reduce the loads in load-bearing structures caused by dynamic influences. The effectiveness of the use of suspended structures in earthquake-resistant construction was confirmed by studies of the behavior of such objects in earthquake conditions. The development of computer systems allowed us to unlock the potential of using suspended structures in seismically dangerous areas. However, the engineering community has not yet come to an unambiguous solution to the problem of significant displacements of suspended ceilings during low-frequency seismic impacts. The question of ensuring the stability of the core structures of the building also remains open. Proposals for solving these problems, as well as the supporting structures of suspended high-rise buildings themselves, are diverse. This article discusses the main existing and promising design solutions that provide earthquake resistance of high-rise buildings with suspended structures. The results of computational studies of these design solutions are given in the article.

Keywords: high-rise buildings, suspended structures, seismic impact

For citation: Belash T. A., Svitlik I.V. Prospects for the use of structural systems of suspended buildings in seismic areas. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 64-72. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-64-72](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-64-72)

Введение

Подвесные конструкции дают возможность конструктивной реализации как высотных, так и многоэтажных зданий. Наибольшее распространение в строительстве получили подвесные конструкции с жёстким ядром. Ствольная конструктивная система высотных зданий была запатентована американским инженером Фазлуром Рахманом Ханом в 1961 г. [1]. Одной из разновидностей высотных и многоэтажных зданий с несущим ядром являются здания, возведённые по системе с подвешенными этажами.

Ключевое достоинство данной системы заключается в замене продольно изгибающихся колонн на меньшие по площади подвески, что обеспечивает меньшую материалоемкость. Помимо этого стоит отметить, что данная конструктивная система может применяться в плотной городской застройке, так как на уровне первых этажей ядро здания является единственной несущей конструкцией и обладает меньшим по сравнению с планом здания фундаментом [2]. Использование такого фундамента обеспечивает одинаковую осадку всех конструктивных частей зданий, что позволяет применять подобный вариант в первую очередь в сейсмических районах и на неоднородных основаниях [3]. Податливость конструкций зданий с подвешенными этажами в том числе позволяет таким зданиям считаться сейсмостойкими [4].

К основной проблеме использования подвесных систем относится возникновение неупругих деформаций подвесок. Также висячим системам присуща аэродинамическая неустойчивость, что делает более сложными методы проектирования, строительства и обеспечения общей устойчивости зданий [5]. Необходимость создания на верхнем торце ствола здания мощных конструкций консольных оголовков может свести на нет экономию материала от использования растянутых подвесок вместо сжатых колонн [2]. Также к недостаткам систем такого типа можно отнести необходимость создания массивных конструкций ствола жёсткости, так как они должны полностью воспринимать горизонтальные нагрузки, а также развитых конструкций фундаментов для опирания несущего ствола. При этом эти конструкции должны учитывать относительные перемещения между стволом и конструкциями подвешенных этажей, возникающие, например, при сейсмических воздействиях.

Было установлено, что применение зданий подвесного типа оправдано при высокой вероятности возникновения высокочастотных землетрясений на площадке строительства.

Однако их использование в зданиях, расположенных в районах низкочастотных землетрясений, способно привести к негативным эффектам в виде раскочки перекрытий и повреждения целостности несущих конструкций. Предложения по решению проблем обеспечения сейсмостойкости зданий с подвесными конструкциями отличаются многообразием. В данной работе будут приведены некоторые из подходов к этой проблеме и проведены расчётные исследования, целью которых является определение эффективности использования различных решений применительно к конкретной задаче. Для проведения расчётов были выбраны четыре конструктивные схемы зданий с подвесными конструкциями (рис. 1-4). Расчётные модели представляют собой 15-этажное здание высотой 64 метра с перекрытиями, подвешенными к металлическому оголовку на 16 подвесках по внутреннему и внешнему контуру. Перекрытия и несущий ствол здания имеют круглую форму, диаметр ствола равен 8 метрам, диаметр перекрытия – 16 метрам. Подвески первой расчётной модели свободно подвешены вдоль ствола здания без установки связей с несущими стенами (рис. 1). Вторая модель реализует принцип создания жёстких этажных блоков за счёт установки крестовых связей (рис. 2), подвешенная конструкция при этом соединяется со стволом здания через элементы упругой связи в уровнях 2-го и 15-го этажей (рис. 5). Третья модель представляет собой исходную конструкцию с добавлением упругих связей между перекрытиями и ядром жёсткости на каждом этаже здания (рис. 3, 5). Упругие связи четвертой модели расположены между оголовком и стволом здания (рис. 4, 6). Места установки упругих связей в расчётных схемах выделены цветом на рисунках 2-6.

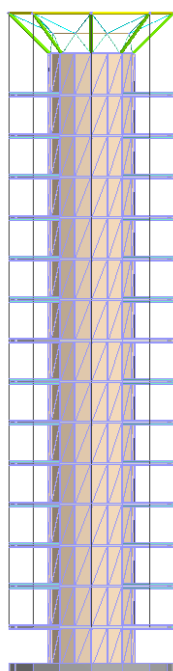


Рисунок 1 – Первая расчётная модель

Figure 1 – First calculation model

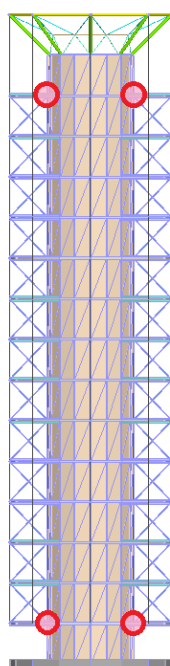


Рисунок 2 – Вторая расчётная модель

Figure 2 – Second calculation model

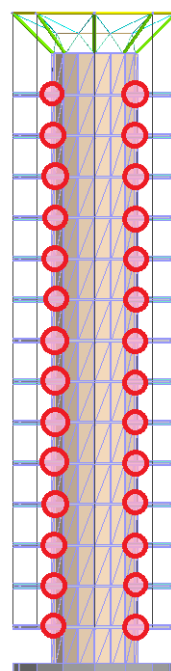


Рисунок 3 – Третья расчётная модель

Figure 3 – Third calculation model

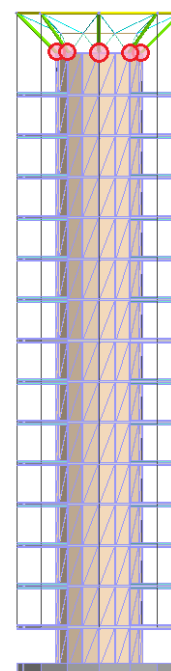


Рисунок 4 – Четвёртая расчётная модель

Figure 4 – Fourth calculation model

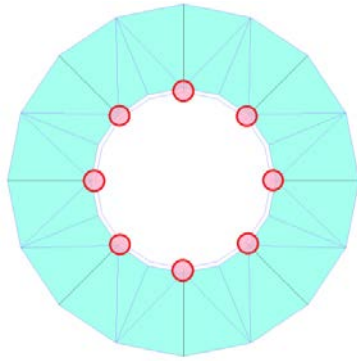


Рисунок 5 – Схема расположения на плане упругих связей во второй и третьей моделях

Figure 5 – The location of the elastic constraints on the plan in the second and third models

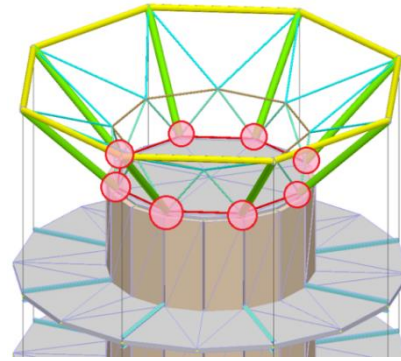


Рисунок 6 – Схема расположения упругих связей в четвёртой модели

Figure 6 – The location of the elastic constraints in the fourth model

Для всех расчётных моделей было принято, что стены ствола и перекрытия выполнены из бетона прочности В25 и имеют толщину 0,5 и 0,2 метра соответственно. Несущий оголовок выполнен из стальных труб различных диаметров марки С255. В качестве балок перекрытия использованы стальные двутавры профиля 50Б1 марки С255. Сечение элементов подвесок представлено стальным проволочным канатом.

Для расчётных исследований в веб-базе данных о движении грунта Тихоокеанского центра инженерных исследований землетрясений были подобраны акселерограммы землетрясений с различными спектрами реакции (рис. 7). Подобранные землетрясения имеют широкий диапазон частот. На основе преобладающих периодов колебаний T в спектрах реакции было принято условное разделение записей землетрясений на высокочастотные ($T < 0,3$ с), среднечастотные ($0,3 \text{ с} \leq T < 1$ с) и низкочастотные ($T \geq 1$ с). Таким образом, к высокочастотным относятся землетрясения, произошедшие в г. Алмирос и области Фриули, к среднечастотным – землетрясение в г. Грива, и к низкочастотным – землетрясения в г. Цзици и горах св. Ильи.

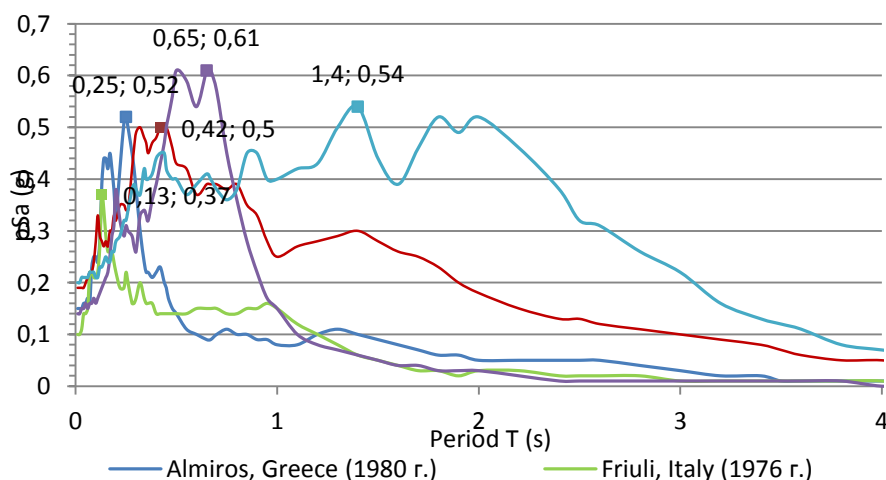


Рисунок 7 – Спектр реакции землетрясений (T ; pSa)

Figure 7 – Earthquake response spectrum (T ; pSa)

Расчёт производился в программном комплексе ЛИРА с использованием модуля Динамика плюс. Данный модуль позволяет производить моделирование отклика конструкции на динамические воздействия и выполнять расчёт во временной области с применением инструментальных сейсмограмм. При задании динамического нагружения сейсмограммы прикладывались к основаниям расчётных моделей как узловые нагрузки. В качестве допущения не учитывалась совместная работа здания и основания. Соединение фундаментной плиты и основания условно принято жёстким.

Как было сказано выше, относительные смещения между подвесными конструкциями и ядром жёсткости здания наряду с возможным возникновением эффекта раскачки подвешенных перекрытий представляют ключевую угрозу для целостности несущих конструкций подобных объектов. Поэтому в качестве определяющего фактора эффективности использования предложенных решений по обеспечению сейсмостойкости зданий подвешенного типа были выбраны перемещения перекрытий расчётных схем в условиях различных землетрясений.

Несущие подвески могут быть выполнены как из стальных канатов, так и из элементов стального проката, таких как полосы, трубы, швеллеры. Так как несущая способность высокопрочных стальных канатов выше, чем у обычных строительных сталей, их применение способно обеспечить экономию материалов и снижение веса подвешенных конструкций. Ванта в таком случае обладает более низкой изгибной жёсткостью, что значительно влияет на перемещения перекрытий при сейсмических воздействиях. Применение стальных труб в качестве подвесок приводит к раскачке перекрытий. Подвески, выполненные из стальных канатов, практически не передают колебания несущего ростверка на нижележащие этажи, что на первом этапе обусловило их выбор для дальнейших расчётов. Однако перемещения верхнего подвешенного перекрытия, как и относительные смещения двух верхних этажей, принимают опасные значения (рис. 8).

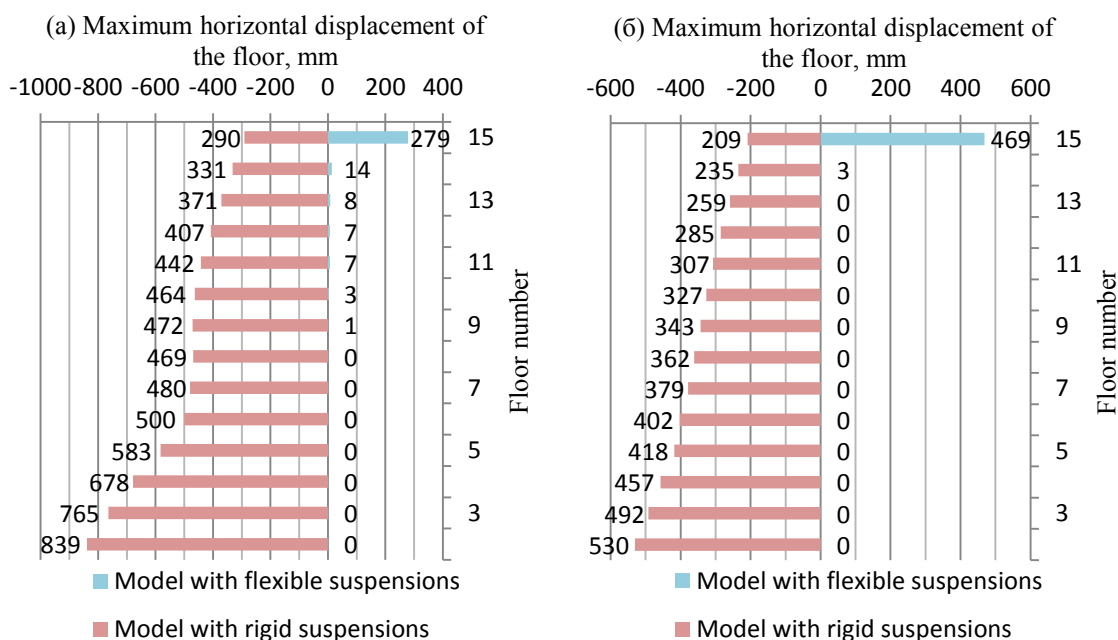


Рисунок 8 – Максимальные перемещения перекрытий первой модели с жёсткими и гибкими подвесками при сейсмическом воздействии: а) горы св. Ильи, Аляска; б) Цзицзи, Тайвань

Figure 8 – Graph of maximum floor displacements of the first model with rigid and flexible suspensions during seismic impact: a) St Elias, Alaska; b) Chi-Chi, Taiwan

С целью их уменьшения могут быть применены конструктивные решения, описанные выше. Результаты расчётов представлены на рисунке 9.

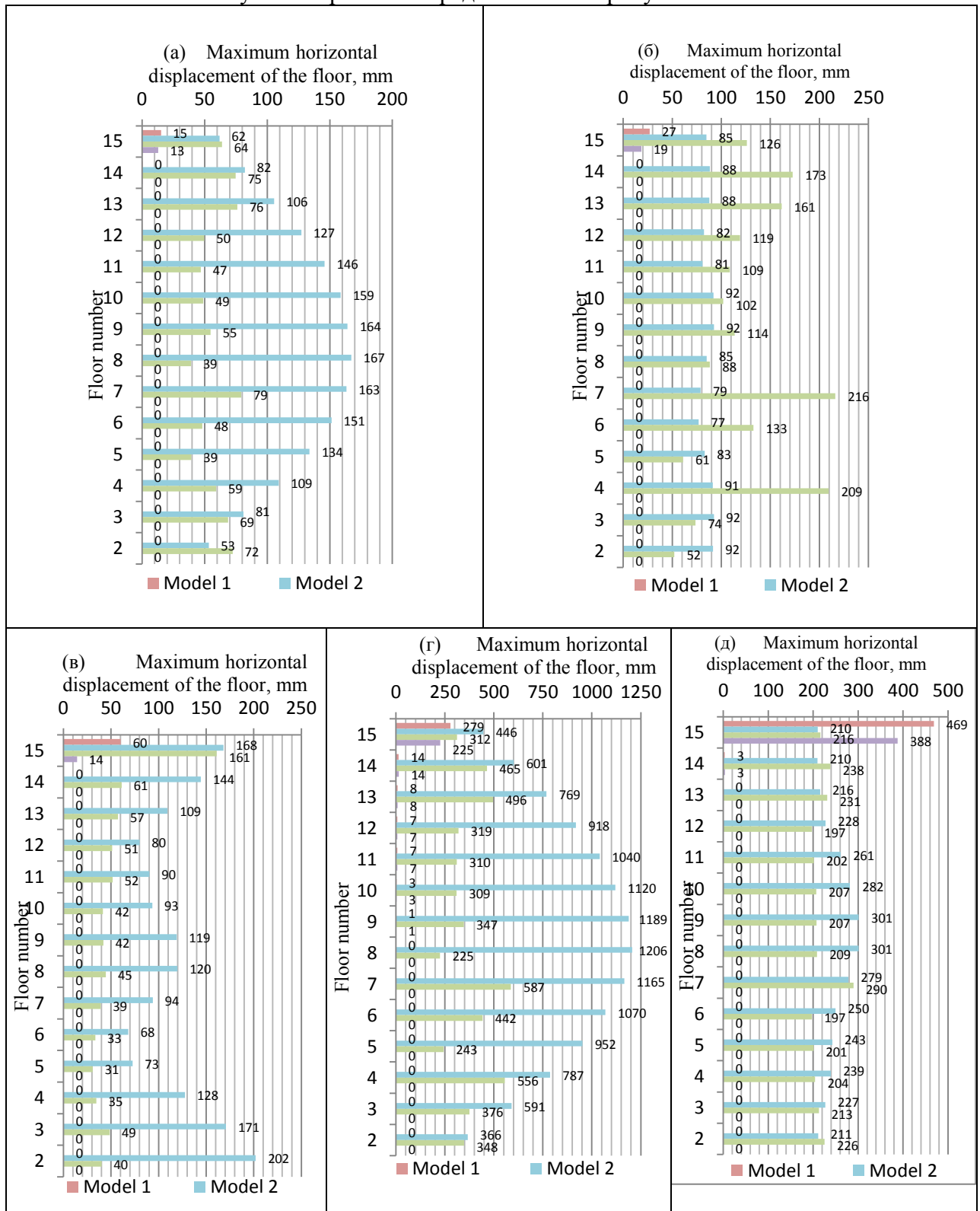


Рисунок 9 – Максимальные перемещения перекрытий моделей при сейсмическом воздействии: а) Фриули, Италия; б) Алмирос, Греция; в) Грива, Греция; г) горы св. Ильи, Аляска; д) Цицзи, Тайвань

Figure 9 – Graph of maximum floor displacements of models during seismic impact: a) Friuli, Italy; b) Almiros, Greece; c) Griva, Greece; d) St Elias, Alaska; e) Chi-Chi, Taiwan

Увеличение боковой жёсткости подвесных конструкций за счёт введения крестовых связей позволило уменьшить межэтажный дрейф при всех рассматриваемых сейсмических воздействиях (рис. 10), что в теории может сохранить целостность внутренних конструкций здания, а также элементов фасада. Однако в случае низкочастотного землетрясения в горах св. Ильи данный подход привёл к возникновению значительных перемещений средних этажей здания (рис. 9 г).

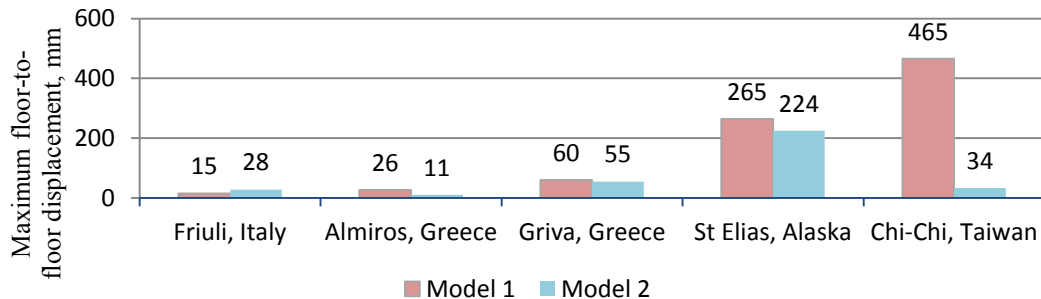


Рисунок 10 – Максимальные межэтажные смещения перекрытий первой и второй моделей

Figure 10 – Maximum floor-to-floor displacements of the first and second models

Продольная жёсткость упругих связей в составе третьей расчётной схемы подбиралась на основании усилий, возникающих в этих связях при моделировании землетрясения, произошедшего в г. Цзици (рис. 11). Несмотря на то, что применение подобного решения обеспечения сейсмостойкости подвесного здания не дало каких-либо положительных результатов в уменьшении перемещений подвесных конструкций (рис. 9), стоит отметить, что в некоторых случаях такой подход позволил уменьшить перемещения ядра жёсткости здания (рис. 12). Подвешенные перекрытия могут быть использованы в качестве демпфера настроенной массы, но при этом подбор оптимальных характеристик связей остаётся серьёзной проблемой, решением которой может являться, например, применение генетического алгоритма [6].

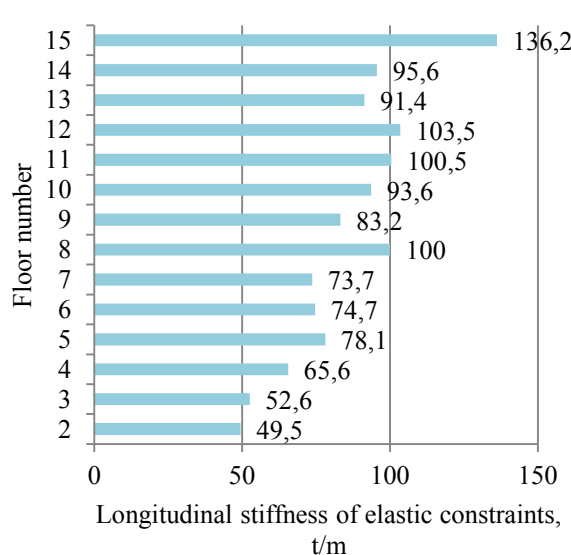


Рисунок 11 – Продольные жёсткости конечных элементов упругой связи третьей модели

Figure 11 – Longitudinal stiffness of elastic constraints of the third model

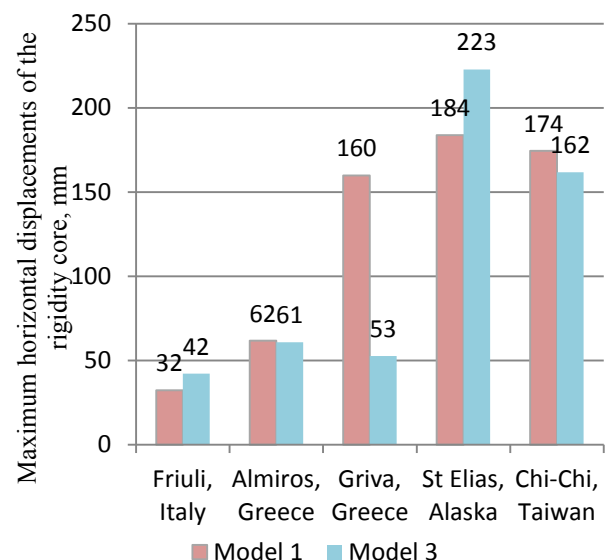


Рисунок 12 – Максимальные перемещения конструкций ядра жёсткости первой и третьей моделей

Figure 12 – Maximum horizontal displacements of the rigidity core of the first and third models

Применение конечных элементов упругой связи на всех этажах позволило уменьшить значения перемещений подвесных конструкций при сейсмическом воздействии на Тайване. Более детальный подход в определении продольных жёсткостей упругих связей потенциально способен снизить перемещения перекрытий при землетрясениях с другими интенсивностью и спектрами реакции.

Внедрение в расчётную схему упругих связей между оголовком и стволом здания привело к снижению максимальных перемещений подвешенных перекрытий при всех моделируемых землетрясениях. Применение подобного решения позволило снизить перемещения перекрытий на 13% при низкочастотном землетрясении в провинции Фриули (рис. 9 а), на 76% при среднечастотном землетрясении в г. Грива (рис. 9 в) и на 17% при низкочастотном землетрясении в горах св. Ильи (рис. 9 д).

Заключение

1. Введение крестовых связей во второй расчётной схеме позволило уменьшить межэтажный дрейф при сейсмических воздействиях различных частотных составов, что способно сохранить целостность внутренних конструкций здания, а также элементов фасада.
2. Применение поэтажных упругих связей позволило уменьшить амплитуду колебаний ствола здания для среднечастотного и низкочастотного сейсмических воздействий.
3. Наиболее эффективной является демпферная конструкция, представленная в четвёртой схеме. Применение упругих связей между оголовком, несущим подвесные конструкции, и стволом здания позволило уменьшить опасные перемещения перекрытий при всех рассмотренных сейсмических воздействиях, обладающих различным спектром частот.
4. Выбор конструктивной реализации механизма подвески перекрытий должен определяться на основе данных о характере преобладающих в районе строительства землетрясений.

Список литературы

1. Саркисян М. Designing tall buildings: Structure as architecture. Нью-Йорк: Routledge, 2012. 203 с.
2. Козак Ю. Конструкции высотных зданий / Перевод с чеш. Казиной Г.А. Под ред. Дыховичного Ю.А. М.: Стройиздат. 1986. 308 с.
3. Ендеде М., Шейнога И. Высотные здания с диафрагмами и стволами жёсткости / Перевод с чеш. Длгова Е.Б. Под ред. Казиной Г.А. М.: Стройиздат. 1980. 336 с.
4. Копытов М.М. Металлические конструкции высотных зданий. М.: АСВ, ТГАСУ, 2016. 401 с.
5. Шуллер В. Конструкции высотных зданий / Перевод с англ. Килимника Л.Ш. Под ред. Казиной Г.А. М.: Стройиздат. 1979. 248 с.
6. Ye Z., Wu G. Optimal lateral aseismic performance analysis of mega-substructure system with modularized secondary structures. Structural Design of Tall and Special Buildings. 2017, no.17, pp. 1-14.

References

1. Sarkisian M. Designing tall buildings: Structure as architecture. New York, Routledge, 2012. 203 p.
2. Kozak Yu. Konstrukcii vysoznyh zdaniy [Design of tall buildings], Perevod s chesh. Kazinoj G.A. Pod red. Dykhovichnogo Yu.A. Moscow, Strojizdat. 1986. 308 p. (In Russian)

3. Endele M., Shejnoga I. Vysotnye zdaniya s diafragmami i stvolami zhyostkosti [Tall buildings with diaphragms and cores of rigidity], Perevod s chesh. Dlgova E.B. Pod red. Kazinoj G.A. Moscow, Strojizdat, 1980. 336 p. (In Russian)
4. Kopytov M.M. Metallicheskie konstrukcii vysotnyh zdaniy [Metal structures of tall buildings]. Moscow, ASV, TSUAB, 2016. 401 p. (In Russian)
5. Shuller V. Konstrukcii vysotnyh zdaniy [High-rise building structures], Perevod s angl. Kilimnika L.Sh. Pod red. Kazinoj G.A. Moscow, Strojizdat. 1979. 248 p. (In Russian)
6. Ye Z., Wu G. Optimal lateral aseismic performance analysis of mega-substructure system with modularized secondary structures. Structural Design of Tall and Special Buildings. 2017, no. 17, pp. 1-14.

Информация об авторах / Information about authors

Белаш Татьяна Александровна, д.т.н., профессор. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Tatiana A. Belash, D.Sc. (Technology), Professor. Saint-Petersburg, Russian Federation

Свитлик Илья Владимирович*, аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Ilya V. Svitlik *, postgraduate student, Department «Building structures, buildings and structures», Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. Saint-Petersburg, Russian Federation

УДК 624.137.5

DOI [10.37153/2618-9283-2021-5-73-86](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-73-86)

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Сравнение работы двух конструкций инженерной защиты в сейсмически активном районе на примере объекта «Инженерная противооползневая защита северного склона хребта Псехако»

Афанасьев Никита Александрович¹

¹АО НИЦ «Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсевича.
Москва, Российская Федерация

Аннотация: В статье на примере объекта «Инженерная противооползневая защита северного склона хребта Псехако» рассмотрена работа различных вариантов удерживающих конструкций инженерной защиты. Участок строительства включает Нижнюю станцию канатной дороги «F» и удерживающее сооружение СТ-3, входящие в состав Горно-туристический центр ОАО «Газпром». ГТЦ «ОАО «Газпром» находится в Адлерском районе г. Сочи. Объект находится в сейсмически опасном районе, что повышает риск образования опасных геологических процессов, следовательно, повышаются требования к устройству мероприятий инженерной защиты, появляется необходимость расчета сооружения на сейсмическое воздействие.

В работе рассмотрено два типа сооружений противооползневой защиты, соответствующие двум этапам работ. Первый этап – исходное состояние объекта - строительство станции канатной дороги, строительство подпорной стенки СТ-3, устройство анкерных полей ниже по склону и крепление СТ-3 анкерами. Второй этап – реконструкция системы инженерной защиты – устройство новых подпорных стен ниже по склону.

Математическое моделирование производилось в расчетном комплексе Plaxis 2D. Расчет устойчивости производился для различных комбинаций вариантов инженерной защиты. Полученные расчетные коэффициенты устойчивости сравнивались с нормированным значением коэффициента устойчивости склона (откоса) для математического моделирования ($k_{st} \geq [k_{st}]$, $[k_{st}] = \gamma_n \psi / \gamma_d$), сделаны выводы, даны рекомендации.

Ключевые слова: инженерная защита, сейсмический район, опасные геологические процессы, математическое моделирование, расчет устойчивости

Для цитирования: Афанасьев Н.А. Сравнение работы двух конструкций инженерной защиты в сейсмически активном районе на примере объекта «Инженерная противооползневая защита северного склона хребта // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2021. № 5. С. 73-86. DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-73-86](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-73-86)

Seismic safety and seismic isolation of buildings

Comparison of the work of various variants of engineering protection structures and their combinations in a seismic area on the example of the object "Engineering landslide protection of the northern slope of the Psekhako ridge"

Afanas'ev Nikita A.¹

¹JSC Research Center of Construction NIIOSP named after N.M. Gersevanov. Moscow, Russian Federation

Abstract: The paper contains the work of various variants of retaining structures of engineering protection. The paper contains the project "Engineering landslide protection of the northern slope of the Psekhako ridge". The construction site is located in the Adler district of Sochi. The construction area includes the Lower station of the cableway "F" and the retaining Wall-3, which are part of the Gazprom Mountain Resort. The object is located in a seismically dangerous area, which increases the risk of the formation of dangerous geological processes. The requirements for the device of engineering protection measures increase, there is a need for calculations of the structure for seismic impact. The paper considers two types of anti-landslide protection structures – two stages. The first stage is the "Initial state of the object" – the construction of a cableway station, the construction of a retaining Wall-3, the fixing of the slope by anchor fields and the fixing of Wall-3 by anchors through the construction. The second stage is the "Reconstruction of the engineering protection system" – the installation of new retaining walls lower down the slope. Numerical modeling was performed by PLAXIS 2D. The stability calculation was performed for a different combination of engineering protection options, the calculated safety factors were compared with the normalized value of the slope stability coefficient for numerical modeling. In results of the work made conclusions and recommendation.

Keywords: engineering protection, seismic area, dangerous geological processes, mathematical modeling, stability calculation

For citation: Afanas'ev N. A. Comparison of the work of various variants of engineering protection structures and their combinations in a seismic area on the example of the object "Engineering landslide protection of the northern slope of the Psekhako ridge". *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 73-86. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-73-86](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-73-86)

Введение

Современное строительство сегодня – это, в основном, строительство сложных, уникальных зданий и сооружений. Такие объекты требуют особого подхода с конструктивной точки зрения. Для их проектирования существует ряд повышенных требований, в том числе требования по безопасности. При строительстве нетиповых объектов необходимо производить ряд сопутствующих мероприятий. В ряде случаев одним из видов таких мероприятий является устройство инженерной защиты. Поэтому устройство систем инженерной защиты в период активного строительства уникальных и зрелищных объектов является актуальной задачей строительной науки и практики.

Отметим, что существуют случаи, когда устройство инженерной защиты порождает новые опасные геологические процессы, прогнозирование которых на этапе проектирования невозможно. В данной статье на примере объекта «Инженерная противооползневая защита северного склона хребта Псехако», который был использован при проведении Олимпийских игр в Сочи, рассмотрен именно такой случай.

Исходные данные

Рассматриваемый участок располагается в Адлерском районе г. Сочи, в 3 км к северу от п. Эсто-Садок на водораздельной части хребта Псехако (рис. 1-2). Участок строительства входит в

состав Сочинского государственного природного национального парка. Поверхность свободна от плотной застройки, на участке растет смешанный лес.

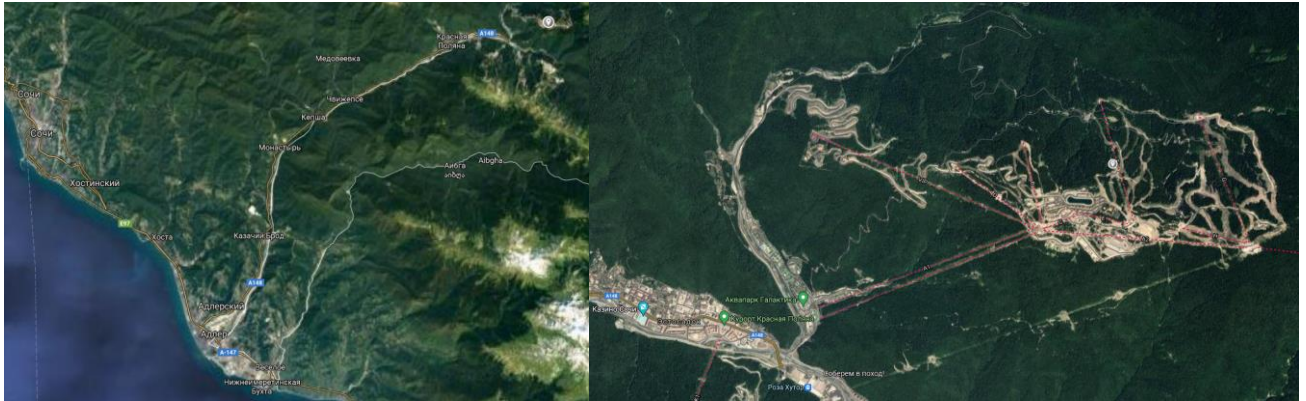


Рисунок 1 – Расположение участка строительства

Figure 1 – Construction site location

ГТЦ ОАО «Газпром» – комплекс сооружений для проведения отдыха и спортивных мероприятий по лыжным видам спорта. Комплекс включает горнолыжные спуски (трассы), 8 канатных дорог, лыжный стадион, гостиницы и коттеджи, сооружения для летних видов спорта (волейбольные площадки, теннисные корты), аквапарк, а также сооружения оснежения, энергоснабжения, безопасности, связи и другие обслуживающие и вспомогательные сооружения. Комплекс использовался при проведении Зимних Олимпийских Игр 2014 года. Класс ответственности всех сооружений, за исключением канатной дороги – II (нормальный), канатная дорога имеет I уровень ответственности

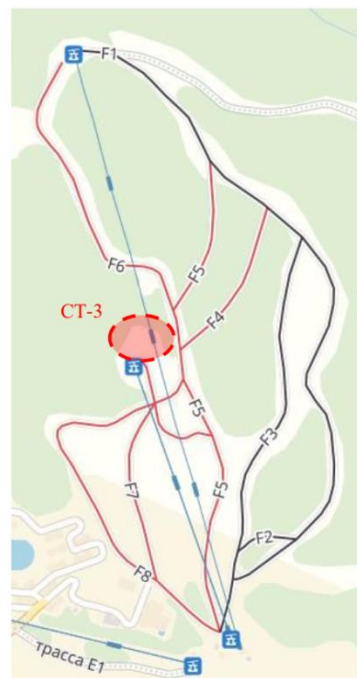


Рисунок 2 – Участок строительства

Figure 2 – Construction site

Сооружение инженерной защиты

В рамках данной статьи рассматривается сооружение инженерной защиты СТ3, предотвращающее развитие опасных инженерно-геологических процессов в районе нижней станции канатной дороги «F».

Удерживающая стена СТ-3 протяженностью 111 м выполняется из двух и трех рядов буронабивных свай диаметром 820 мм длиной 25.0 м, устроенных с шагом 1,5 м в плане (рис.3-4). Монолитная железобетонная стена уголкового типа имеет высоту надземной части от 6 до 9 метров и толщину плитной части 1,2 м. Для обеспечения дополнительной устойчивости конструкции через тело СТ-3 предусмотрены удерживающие анкеры.

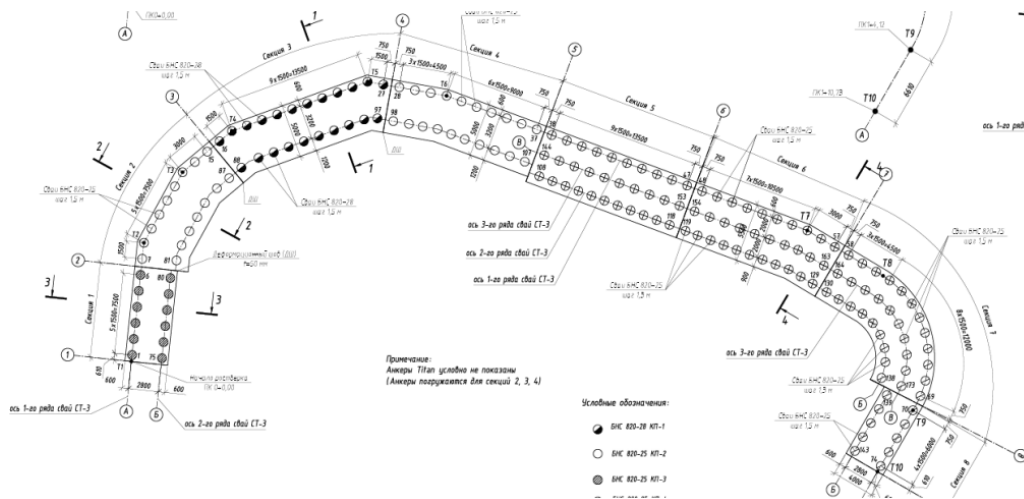


Рисунок 3 – План подпорной стены СТ-3

Figure 3 – The retaining wall ST-3 plan

Откосы ниже по склону СТ-3 закрепляются грунтовыми анкерами 6-27 метров с шагом в плане 2x2 метра. Также предусмотрено закрепление склона анкерными железобетонными плитами на анкерах длиной 21 м.

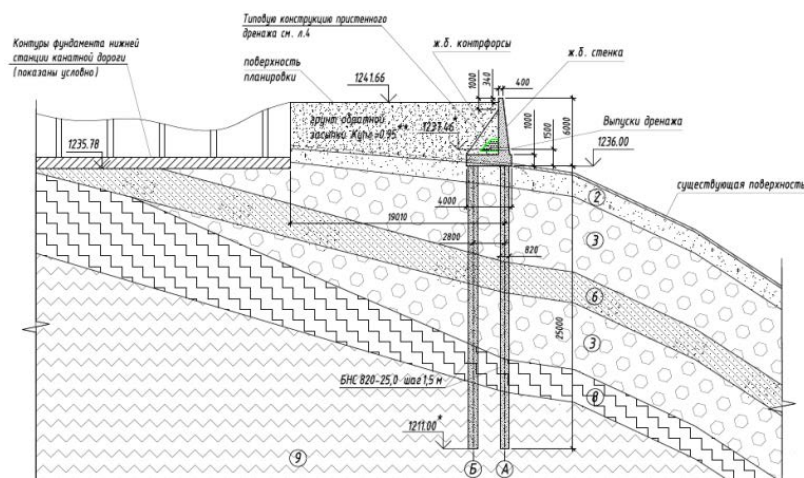


Рисунок 4 – Типовой разрез по стене СТ-3

Figure 4 – Section of retaining wall ST-3

В результате неполного завершения строительных работ при возведении объекта, в процессе эксплуатации на участке ниже СТ-3 по склону стоки воды привели к тому, что из-за оползневых явлений сваи в основании уголковой подпорной стены сократили свою заделку в грунт на 10 метров. Перемещения секций подпорной стены в плане превысили 20 см. Верхняя часть свай обнажилась (рис.5), а рельеф склона серьезно изменился. Запас устойчивости удерживающего сооружения СТ-3 понизился по отношению к нормативному значению и потребовалось перепроектирование.



Рисунок 5 – Обнажение буронабивных свай фундамента СТ-3

Figure 5 – Opening of retaining wall's ST-3 bored piles

Реконструкция системы инженерной защиты

Для аварийного участка в районе СТ-3 рассматривается изменение конструктивного решения инженерной защиты с системы нагельных полей на террасирование, выполаживание и систему ступенчатых подпорных стен для предотвращения развития оползневых процессов.

Предусмотрены следующие мероприятия:

- усиление основания станции канатной дороги - цементация массива грунта по манжетной технологии. Данные мероприятия позволяют снизить боковое давление на СТ-3 за счет передачи нагрузки на нижележащие слои грунта, повышают жесткость основания и снижают дополнительные осадки и плановые смещения фундамента станции. За счет включения в работу нижележащих коренных слоев грунта повышается устойчивость склона при сейсмическом воздействии;

- выполаживание и террасирование склона ниже СТ-3 и устройством трех ярусов подпорных стен - обеспечение общей устойчивости склона и существующей подпорной стены СТ-3, а также основания фундамента станции канатной дороги, предотвращения обводнения грунтов за счет отсыпки террас из крупнообломочного и хорошо дренирующего материала. Проектный угол выполаживания откоса обеспечивается за счет устройства трех ярусов уголковых подпорных стен из монолитного железобетона.

Высота уголковых подпорных стен - 5,8 м, толщина – 500 - 800 мм, толщина фундаментной плиты - 800 мм.

Угловые стены на склоне устраиваются на свайном основании. Диаметр свай составляет 200 мм. Бетон класса В30. Свайное основание представляет собой пять рядов свай с шагом 1,0 м, расстояние между сваями в ряду - 1,0 м.

Восприятие подпорными стенами бокового давления от массива грунта обеспечивается за счет устройства 3-х ярусов грунтовых анкеров на каждую из стен. Анкеры в ряду располагаются с шагом 2,0 м.

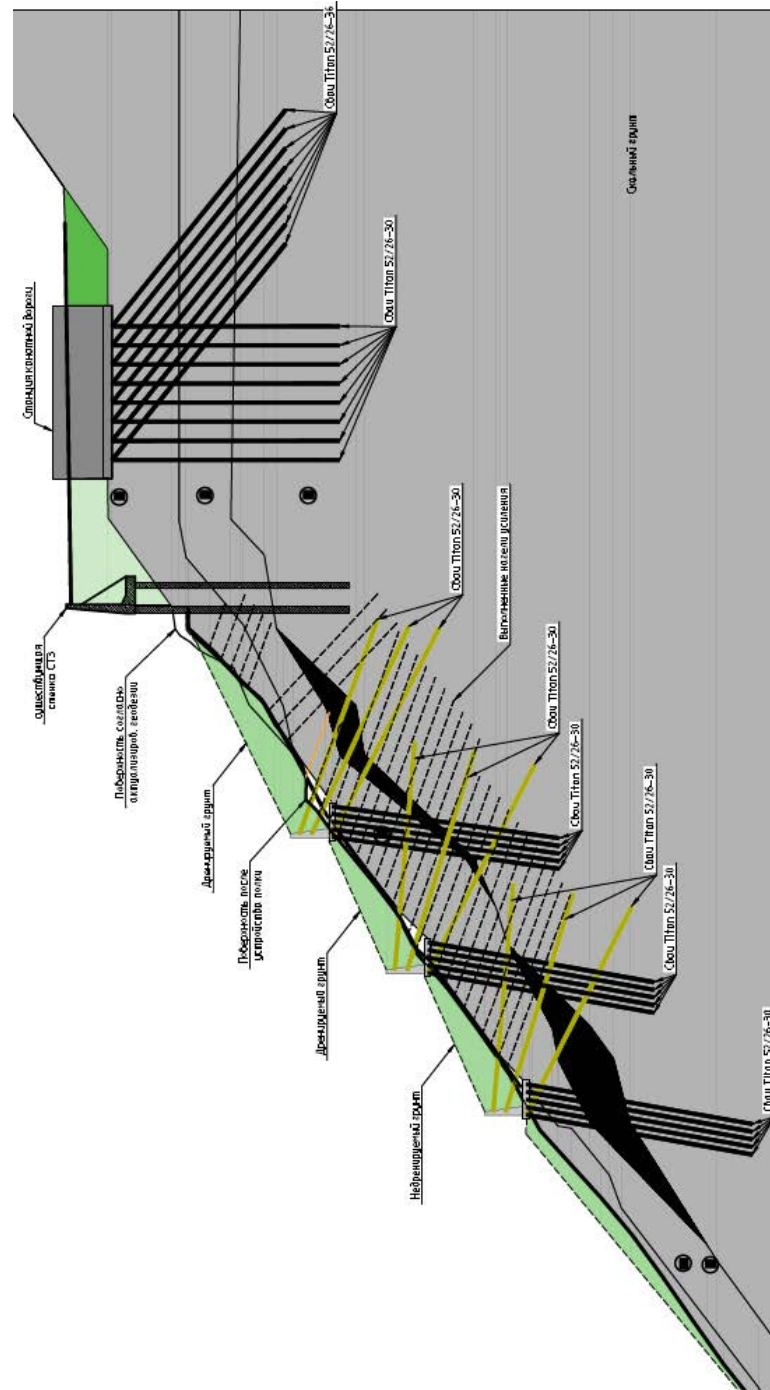


Рисунок 6 – Общая схема новой системы инженерной защиты

Figure 6 – Designed engineering protection general form

Математическое моделирование

Математическое моделирование производилось в расчетном комплексе Plaxis в плоской постановке, что позволяет получить результаты расчетов удерживающих конструкций с некоторым запасом, принимаемым в запас надежности по сравнению с расчетами, выполняемыми в трехмерной постановке. Расчет устойчивости производился для различных комбинаций вариантов инженерной защиты.

Математическое моделирование производилось для следующих этапов (фаз):

- 1) Initial phase – определение природного напряженно-деформированного состояния грунтового массива (склона);
- 2) Устройство станции;
- 3) Устройство исходных нагельных полей;
 - 4.1.1.1) Укрепление фундамента станции;
 - 4.1.1.2) Расчет устойчивости;
 - 4.1.2.1) Устройство системы инженерной защиты;
 - 4.1.2.2) Расчет устойчивости;
 - 4.1.3.1) Приложение сейсмической нагрузки;
 - 4.1.3.2) Расчет устойчивости;
- 4.2.1.1) Устройство системы инженерной защиты;
- 4.2.1.2) Расчет устойчивости;
- 4.2.2.1) Приложение сейсмической нагрузки;
- 4.2.2.2) Расчет устойчивости

В соответствии с СП 116.13330.2012 расчет устойчивости проектируемых противооползневых сооружений и подпорных стен, выполняется в соответствии с зависимостью:

$$k_{st} \geq [k_{st}], [k_{st}] = \gamma_n \Psi / \gamma_d$$

$\gamma_n = 1,15$ - коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый по ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований». Класс рассматриваемого сооружения – КС-2, в соответствии с ГОСТ 27751-2014 принимается не менее $\gamma_n = 1,0$.

$\gamma_d = 1$ – коэффициент условий работы, учитывающий характер воздействий, возможность изменения свойств материалов со временем, степень точности исходных данных, приближенность расчетных схем, тип сооружения, конструкции или основания, вид материала и другие факторы; устанавливается в диапазоне $0,75 \leq \gamma_d \leq 1,00$ нормами проектирования отдельных видов сооружений.

$\Psi = 1$ (для эксплуатационного периода), $\Psi = 0,95$ (для особого сочетания нагрузок (сейсмики)) - коэффициент сочетания нагрузок.

Значение нормированного коэффициента запаса устойчивости для периода эксплуатации:

$$k_{st} = 1 \cdot 1,15 / 1 = 1,15$$

Значение нормированного коэффициента запаса устойчивости с учетом сейсмического воздействия:

$$k_{st} = 0,95 \cdot 1,15 / 1 = 1,093$$

Полученные расчетные коэффициенты устойчивости сравнивались с нормированным значением коэффициента устойчивости склона (откоса) для математического моделирования, сделаны выводы, даны рекомендации.

Результаты расчета

Результаты расчета математического моделирования рассматриваемой задачи представлены на рис. 7 - 16 и сведены в таблицу 1.

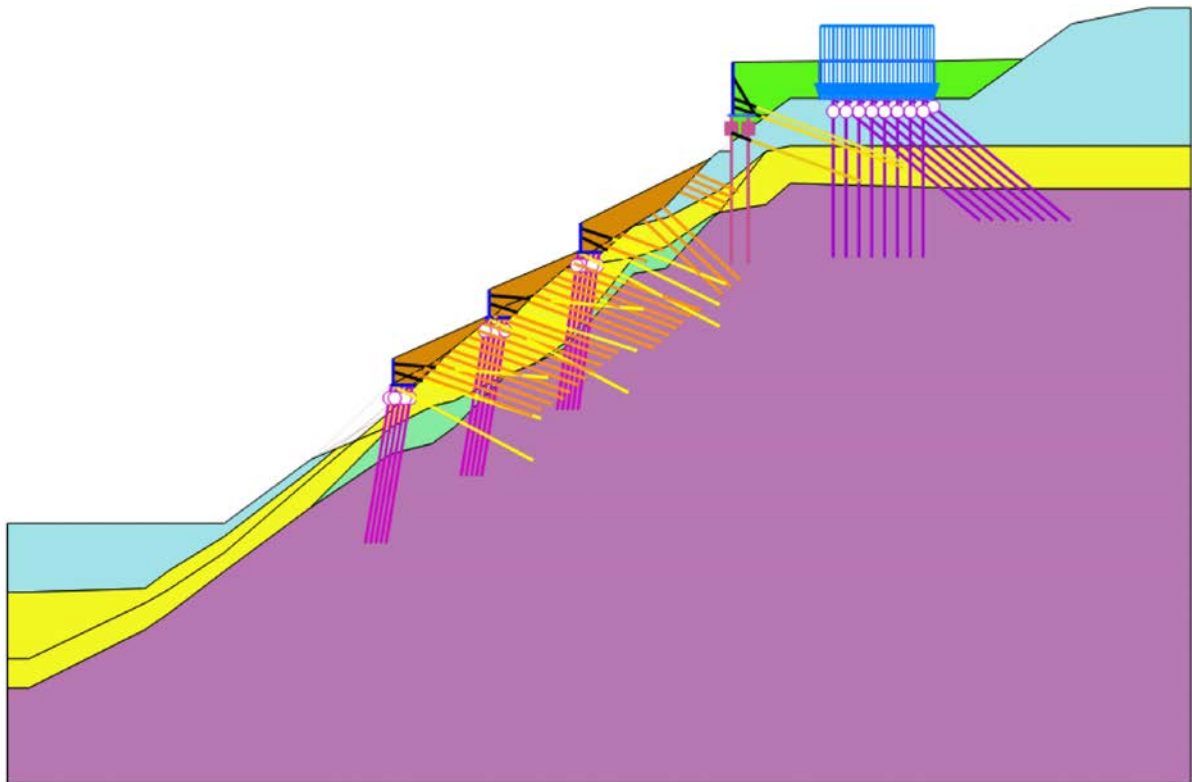


Рисунок 7 – Общий вид расчетной схемы

Figure 7 – Calculation model

Material set								
Identification number	1	2	3	4	5	6	7	
Identification	2	4	1	3	N	2a	Fill	
Material model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	
Drainage type	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	
Colour	RGB 243, 247, 34	RGB 182, 119, 178	RGB 161, 226, 232	RGB 134, 234, 162	RGB 91, 245, 25	RGB 248, 209, 53	RGB 214, 137, 5	
Comments								
General properties								
γ_{unsat}	kN/m ³	20.60	23.60	20.00	20.90	18.00	21.00	18.00
γ_{sat}	kN/m ³	21.60	24.00	21.00	21.90	19.00	22.00	19.00
Material set								
Identification number	1	2	3	4	5	6	7	
Identification	2	4	1	3	N	2a	Fill	
Material model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	
Drainage type	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	
Colour	RGB 243, 247, 34	RGB 182, 119, 178	RGB 161, 226, 232	RGB 134, 234, 162	RGB 91, 245, 25	RGB 248, 209, 53	RGB 214, 137, 5	
Stiffness								
E	kN/m ²	27.30E3	120.0E3	19.80E3	51.00E3	18.00E3	32.90E3	15.00E3
ν (ν_u)		0.3500	0.3000	0.3500	0.3500	0.3200	0.3500	0.3000
Alternatives								
G	kN/m ²	10.11E3	46.15E3	7333	18.89E3	6818	12.19E3	5769
E_{oed}	kN/m ²	43.81E3	161.5E3	31.78E3	81.85E3	25.76E3	52.80E3	20.19E3
Strength								
c_{ref}	kN/m ²	12.60	60.00	20.80	43.00	1.000	12.40	1.000
ϕ (ϕ_i)	°	25.40	32.00	23.00	34.00	28.00	29.20	40.00
ψ (ψ_i)	°	0.000	2.000	0.000	4.000	0.000	0.000	10.00
Velocities								
V_s	m/s	69.39	138.5	59.97	94.16	60.96	75.45	56.07
V_p	m/s	144.4	259.1	124.8	196.0	118.5	157.1	104.9

Рисунок 8 – Физико-механические характеристики грунтов

Figure 8 – Physico-mechanical characteristics of the soils

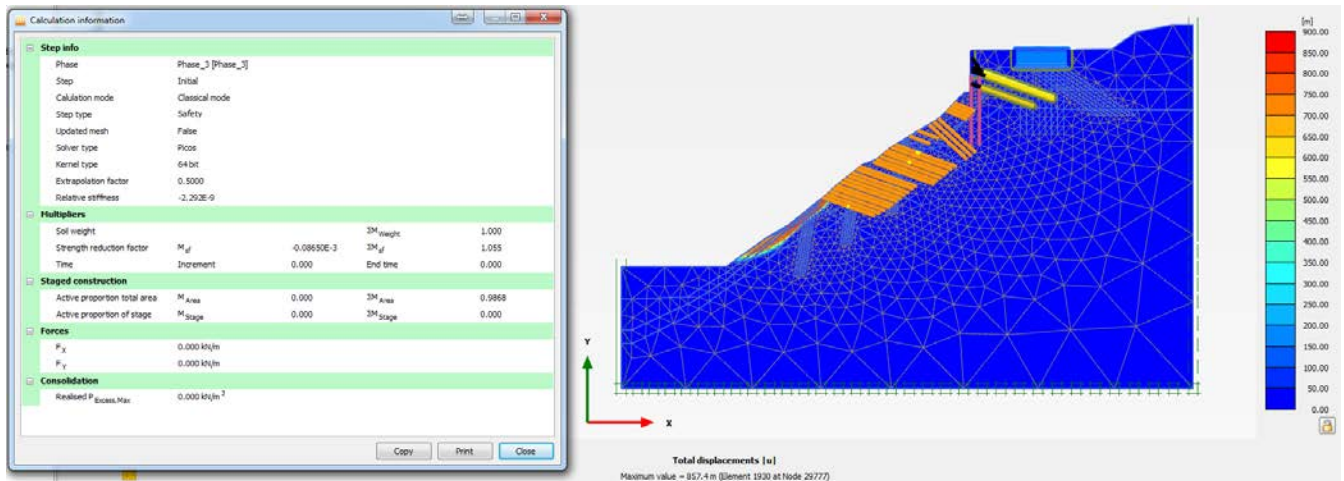


Рисунок 9 – Расчет устойчивости без дополнительных мероприятий (статика), $K_{sf}=1,055$

Figure 9 – Calculation type – safety, static analysis: initial state of slope

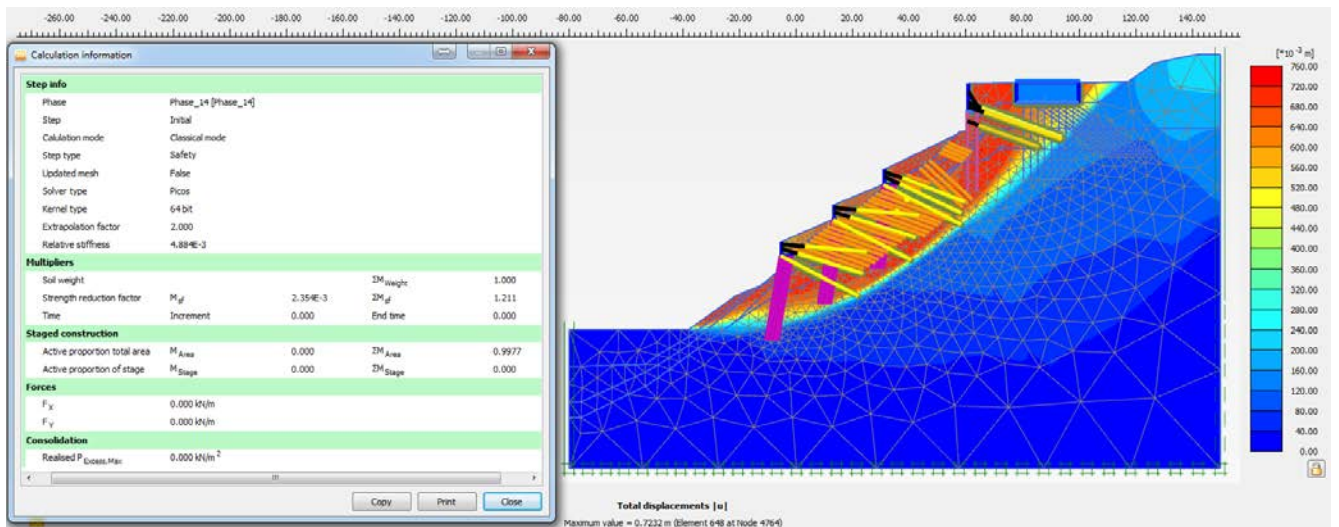


Рисунок 10 – Расчет устойчивости с мероприятиями без усиления фундамента станции (статика), $K_{sf}=1,211$

Figure 10 – Calculation type – safety, static analysis: retaining walls

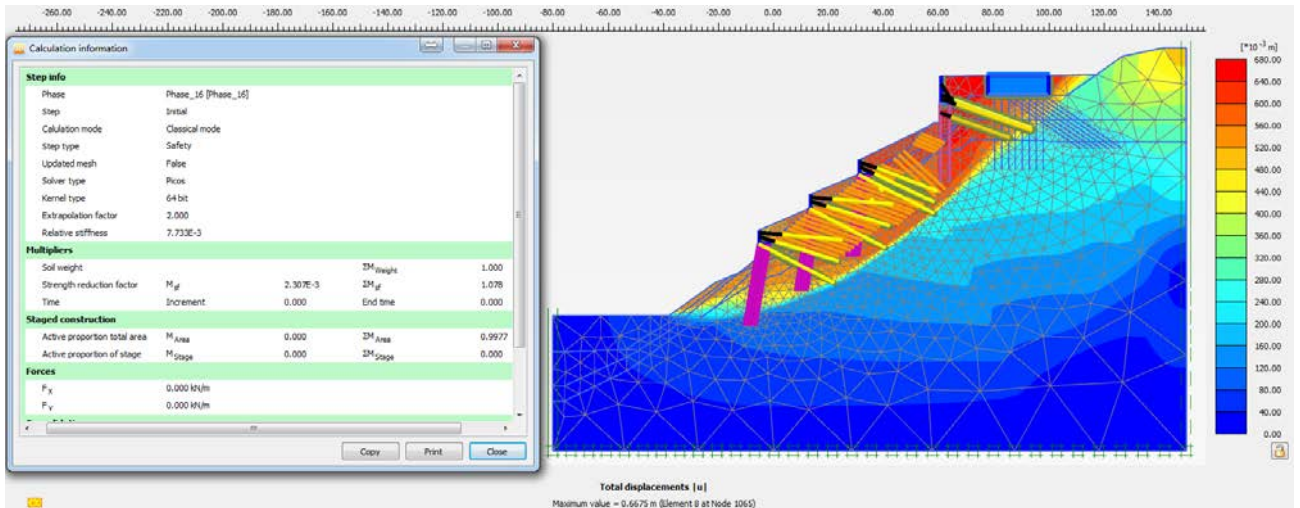


Рисунок 11 – Расчет устойчивости с мероприятиями без усиления фундамента станции (сеймика), $K_{sf}=1,078$

Figure 11 – Calculation type – dynamics, static analysis: retaining walls

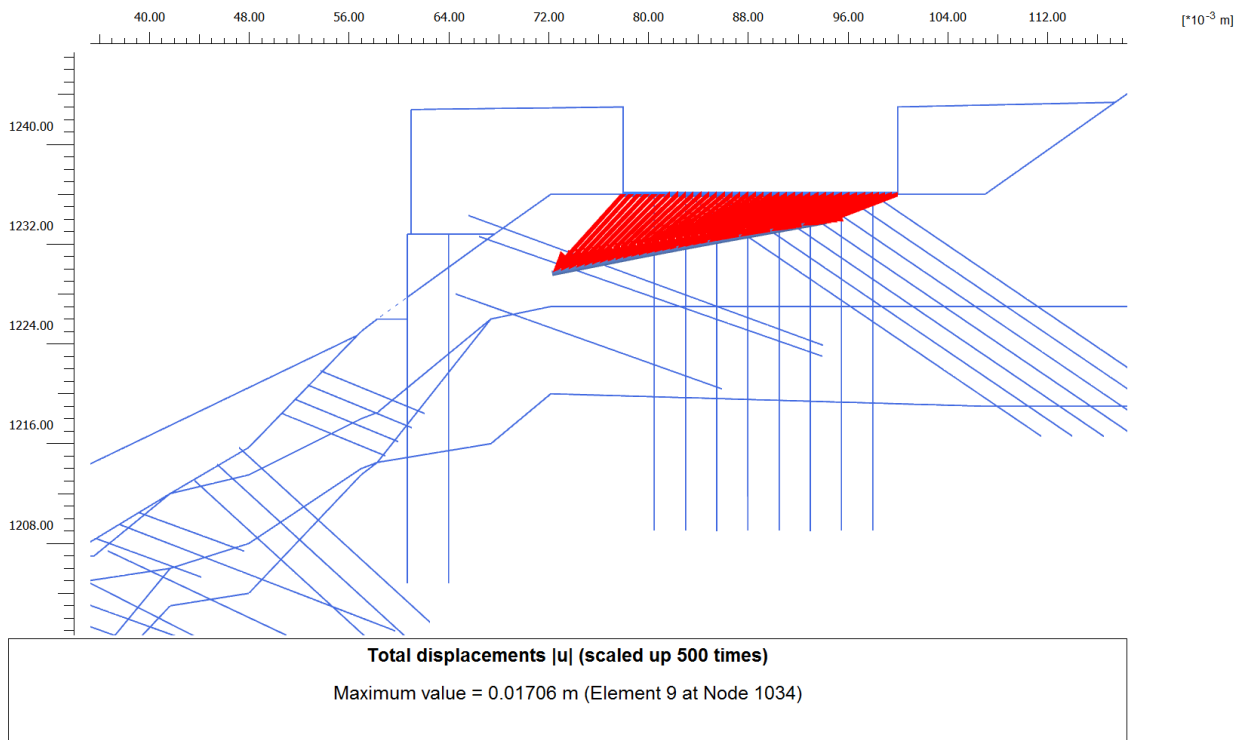


Рисунок 12 – Перемещения фундамента станции без усиления (статика)

Figure 12 – Total displacement: retaining walls

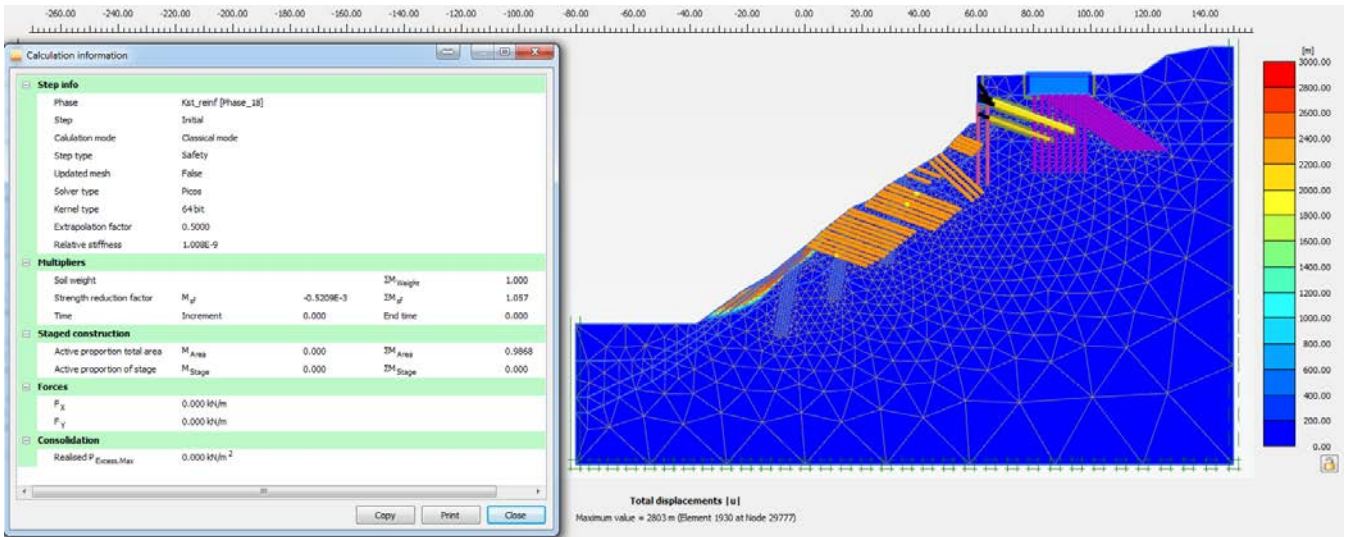


Рисунок 13 – Расчет устойчивости с усилением фундамента станции (статика), $K_{sf}=1,057$

Figure 13 – Calculation type – safety, static analysis: initial state of slope + cement slurry injection

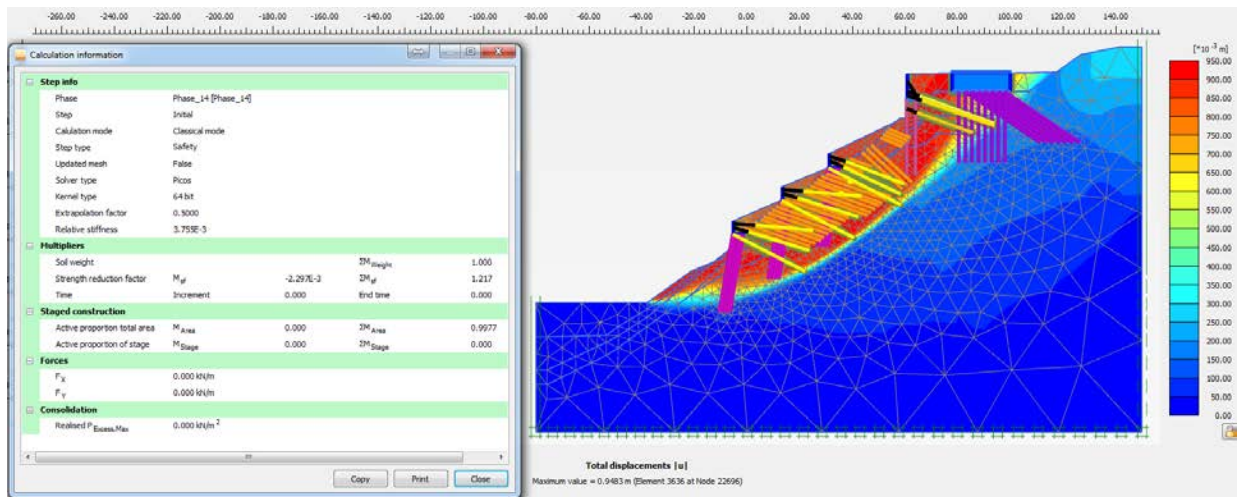


Рисунок 14 – Расчет устойчивости с мероприятиями и с усилением станции (статика), $K_{sf}=1,217$

Figure 14 – Calculation type – safety, static analysis: retaining walls + cement slurry injection

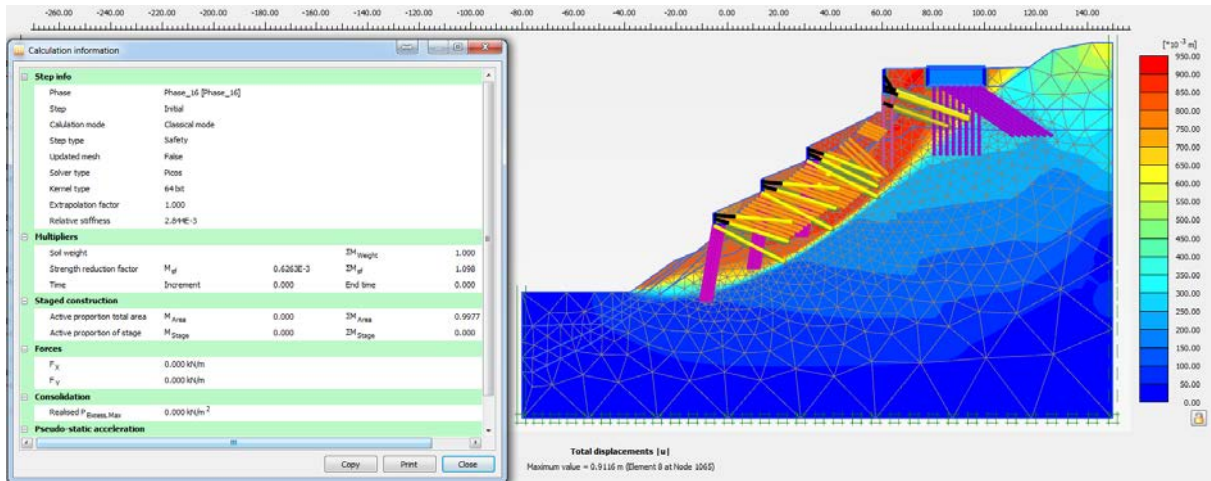


Рисунок 15 – Расчет устойчивости с мероприятиями и с усилением станции (сейсмика), $K_{sf}=1,098$

Figure 15 – Calculation type – dynamics, static analysis: retaining walls + cement slurry injection

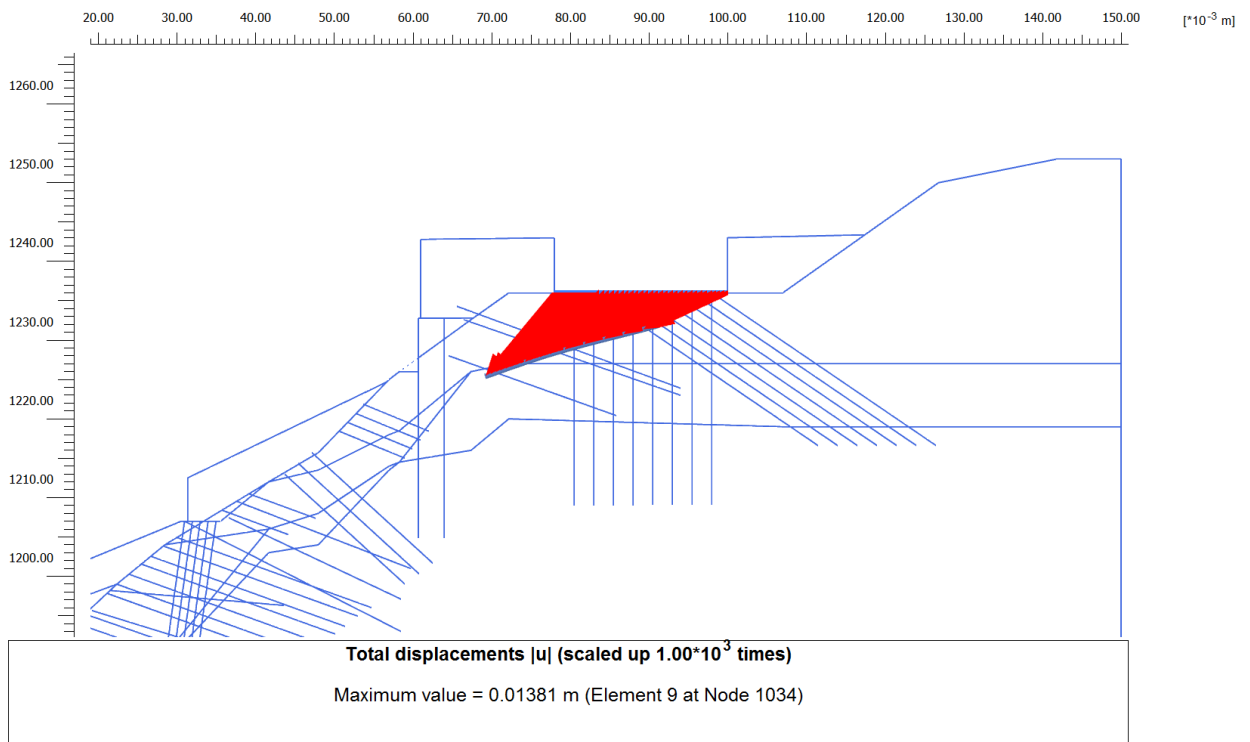


Рисунок 16 – Перемещения фундамента станции с учетом усиления.

Figure 16 – Total displacement: retaining walls + cement slurry injection

Таблица 1 – Результаты математического моделирования

Table 1 – Numeral calculation results

Коэффициент устойчивости склона			
Название этапа	Нормированный коэффициент устойчивости склона для математического моделирования, $[k_{st}]$	Без усиления фундамента станции, K_{sf}	С усилением фундамента станции, K_{sf}
Расчет устойчивости без мероприятий инженерной защиты (статика)	1,15	1,055	1,057
Расчет устойчивости с мероприятиями инженерной защиты (статика)	1,15	1,211	1,217
Расчет устойчивости с мероприятиями инженерной защиты (сейсмика 9 баллов)	1,093	1,078	1,098
Перемещения фундамента*, см			
Окончание строительства инженерной защиты	5,0	1,7	1,4

* - согласно СП 22.13330.2016 Приложение К для гражданских и производственных одноэтажных и многоэтажных зданий с полным железобетонным или стальным каркасом I-й категории технического состояния

Выводы и рекомендации

- 1) В данной статье рассмотрена аварийная работа системы инженерной защиты в виде нагельных полей, расчетом определен коэффициент устойчивости.
- 2) Рассмотрена реконструкция инженерной защиты с системы нагельных полей на террасирование, выполаживание и систему ступенчатых подпорных стен.
- 3) Рассмотрена работа новой инженерной защиты в различных комбинациях – с устройством укрепления основания станции и без укрепления.
- 4) Согласно результатам математического моделирования, принятые конструктивные решения позволяют обеспечить требуемый запас устойчивости данного участка склона при основном и особом сочетании нагрузок в соответствии с нормативной документацией.
- 5) Определены перемещения здания станции канатной дороги.

Список литературы

- 1) СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов»;
- 2) СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах»;
- 3) СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений»;

- 4) СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты»;
- 5) СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции»;
- 6) ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований»;
- 7) ВСН 506-88 Проектирование и устройство грунтовых анкеров

References

- 1) SP 116.13330.2012 «Inzhenernaya zashchita territorij, zdaniy i sooruzhenij ot opasnyh geologicheskikh processov»;
- 2) SP 14.13330.2018 «Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah»;
- 3) SP 22.13330.2016 «Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij»;
- 4) SP 24.13330.2011 «Svajnye fundamenty»;
- 5) SP 63.13330.2012 «Betonye i zhelezobetonnye konstrukcii»;
- 6) GOST 27751-2014 «Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij»;
- 7) VSN 506-88 Proektirovanie i ustrojstvo gruntovyh ankerov

Информация об авторе/Information about author

Афанасьев Никита Александрович, АО «НИЦ «Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, лаборатория механики грунтов № 17. Москва, Российская Федерация

Nikita A. Afanas'ev, Laboratory № 17 of Soil Mechanics NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian federation