



ISSN 2618-9283

СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

DOI 10.37153/2618-9283

EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTIONS SAFETY

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 20.07.2022 г. под номером 2137.

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: февраль, апрель, июнь, сентябрь, ноябрь, декабрь.

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 20.07.2022 listed under the 2137 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, April, June, September, November, December.

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)

Khachiyan 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

№ 4 – 2022

Теоретические и экспериментальные исследования

- Нестерова О.П.** 8
Особенности подбора параметров динамических гасителей сейсмических колебаний в зависимости от модели учета демпфирования
- Широков В.С.** 23
Коэффициент динамичности модульных зданий при сейсмическом воздействии
- Павлова М.О., Захаров В.А., Кошелева Л.И.** 34
К вопросу определения причин трещинообразования в тонких крупноформатных облицовочных плитах
- Римшин В.И., Пакулина Ю.А.** 47
Композиционные материалы в усилении железобетонных конструкций: виды, свойства, методы производства
- Альдреби З.А.** 58
Усиление безопасности памятников архитектуры Сирии с помощью технологий сейсмоизоляции с целью снижения негативного воздействия землетрясений на психику людей
- Короленок Л.М., Снегирев А.Е., Сорокин Н.В.** 81
Методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций

Фото на обложке номера из открытых источников. Последствия землетрясения на Тайване.

12+

ISSN 2618-9283(e) PACS, 2022

CONTENTS

№ 4 – 2022

Theoretical and Experimental Studies

- O. P. Nesterova** **8**
Features of selecting mass damper parameters for seismic oscillations, taking into account different damping models
- V. S. Shirokov** **23**
Dynamic coefficient of modular buildings during seismic load
- M.O. Pavlova, V.A. Zakharov, L.I. Kosheleva** **34**
Increase of seismic resistance of buildings due to spiral reinforcement of bent reinforced concrete structures
- V.I. Rimshin, Yu.A. Pakulina** **47**
Composite materials in reinforcement of reinforced concrete structures: types, properties, production methods
- Z.A. Aldrebi** **58**
Strengthening the security of Syrian architectural monuments with the help of seismic isolation technologies in order to reduce the negative impact of earthquakes on the psyche of people
- L.M. Korolenok, A.E. Snegirev, N. V. Sorokin** **81**
Method of calculation of reconstructed excavation special fortifications in non-rock soils on the impact of seismic waves of a nuclear explosion, taking into account the actual state of the load-bearing structures

Photo on the cover of the issue – from the open sources. Consequences of the earthquake at Taiwan.

УДК624.042.7

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-8-22](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-8-22)

Теоретические и экспериментальные исследования

Особенности подбора параметров динамических гасителей сейсмических колебаний в зависимости от модели учета демпфирования

Нестерова О.П.¹

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(СПбГАСУ). Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: Статья посвящена исследованию влияния способа учета демпфирования в системе на оптимальные параметры динамических гасителей колебаний (ДГК) и их эффективность при сейсмических воздействиях. Рассматриваются установившиеся гармонические колебания демпфированной системы с динамическим гасителем. Расчетная модель представлена двумя массами, соединенными пружинами. Оптимальные параметры гасителя определяются путем минимизации пиковых смещений на амплитудно-частотной характеристике рассматриваемой системы. Рассмотрено четыре способа учета демпфирования: гистерезисное в сооружении и гасителе, эквивалентное вязкое в сооружении и пружине гасителя, гистерезисное в сооружении и пружине гасителя и дополнительное вязкое в пружине гасителя и задание демпфирования пропорционально энергии формы. Установлено, что вид модели учета сил сопротивления значительно влияет на подбор оптимальных параметров ДГК и на его расчетную эффективность.

Ключевые слова: динамический гаситель колебаний, сейсмозащита, учет затухания, сейсмогашение, сильно демпфированные системы, сейсмостойкость

Для цитирования: Нестерова О.П. Особенности подбора параметров динамических гасителей сейсмических колебаний в зависимости от модели учета демпфирования // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 4. С.8-22

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-8-22](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-8-22)

Финансирование: Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») в 2022 году.

Theoretical and experimental studies

Features of selecting mass damper parameters for seismic oscillations, taking into account different damping models

Olga P. Nesterova¹

¹Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU).
Saint-Petersburg. Russian Federation

@ О.П. Нестерова, 2022

Abstract: The paper is devoted to studying the influence of the method of accounting the system damping on the mass damper optimal parameters and their effectiveness under seismic impacts. Steady harmonic oscillations of a damped system with the mass damper are considered. The calculation model is represented by two masses connected by springs. Optimal damping parameters are determined by minimizing peak displacements in the frequency response of the system under consideration.

Four ways of accounting the damping are considered: hysteresis damping in the structure and the damper spring, equivalent viscous damping in the structure and the damper spring, hysteresis damping in the structure and damper spring and additional viscous damping in the damper spring and setting the damping in proportion to the shape mode energy. It has been established that the type of the model for taking into account the resistance forces significantly affects selecting the optimal parameters of the mass damper and its design efficiency.

Keywords: dynamic damper, seismic protection, attenuation seismic suppression, heavily damped systems, seismic resistance

For citation: Nesterova O.P. Features of selecting mass damper parameters for seismic oscillations, taking into account different damping models. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 4, pp. 8-22

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-8-22](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-8-22)

Financing: The paper is based on the results of the research carried out in the frame of the grant on research by the scientific and teaching staff of St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering in 2022 year.

Введение

Землетрясения занимают первое место в мире среди стихийных бедствий по числу человеческих жертв и второе (после наводнений) по материальному ущербу. В сейсмически опасных районах расположено более 20% территории России. В связи с этим сейсмозащита зданий и сооружений является важнейшей задачей. Хорошо известно, что сейсмические нагрузки не являются для сооружений чисто внешними, а генерируются самой конструкцией в процессе сейсмических колебаний. Поэтому эффективными средствами сейсмозащиты являются сейсмоизоляция и сейсмогашение. Статья посвящена исследованию одного из способов сейсмогашения – динамического гасителя колебаний (ДГК). Однако применение ДГК для снижения сейсмических колебаний имеет ряд специфических особенностей.

В рамках теории сейсмостойкости задача подбора оптимальных параметров ДГК при кинематическом воздействии отличается от классической задачи наличием нагрузки на каждую массу системы, а не только на защищаемое сооружение. В связи с этим меняются формулы для определения параметров гасителя. Кроме упомянутого изменения настройки параметров гасителя существуют сложности реализации ДГК на практике. Одна из основных проблем связана с точностью реализации подобранных параметров ДГК. Известно [1, 2], что для ДГК малой массы с $\nu < 0.05$, где ν – относительная масса гасителя, малейшие отклонения в параметрах системы от запроектированных, которые так или иначе появляются в процессе реализации и эксплуатации зданий и сооружений, приводят к отстройке гасителя, и ДГК перестает выполнять свою функцию, а именно, перестает гасить колебания системы. Данную проблему можно разрешить двумя способами. Первый способ предполагает использование активной системы сейсмогашения, то есть параметры гасителя регулируются в зависимости от параметров колебательной системы с помощью компьютеров. Второй способ предполагает использование ДГК большой массы, где $\nu \geq 0.5$

[3-5], в этом случае в качестве ДГК используется часть самого сооружения. Примерами реализации второго способа являются здания с гибким верхним этажом, который выступает в качестве гасителя колебаний [6], мосты, в которых пролетные строения могут быть использованы в качестве ДГК опор моста [3,5] и другие. Во втором примере реализации величина массы ДГК может быть равна массе защищаемого сооружения, т.е. $\nu=1$, и даже может превышать массу сооружения ($\nu=2\div 3$). Однако известно, что существует критическая масса ДГК, при превышении которой гаситель перестаёт выполнять свои функции по снижению колебаний защищаемой системы [4,5]. И значение критической массы зависит от величины затухания в сооружении [7]. При последующем исследовании вопроса подбора оптимальных параметров ДГК встает проблема корректного учета затухания в защищаемом сооружении. Демпфирование в элементах гасителя обычно в 2-3 раза больше, чем в защищаемом сооружении, но это затухание в большинстве случаев вязкое, т.е. частотно зависимое. Также в элементах связи ДГК с сооружением может быть использован демпфер сухого трения. В элементах сооружения затухание гистерезисное. Вопрос учета такого затухания в настоящее время является дискуссионным. Этой задаче, в частности, посвящены работы [7,8]. Ниже рассматривается влияние учет демпфирования на оптимальные параметры гасителя.

Модели учета затухания в сооружении и ДГК

Для анализа в статье рассматривается двухмассная модель сооружения с ДГК (рис. 1).

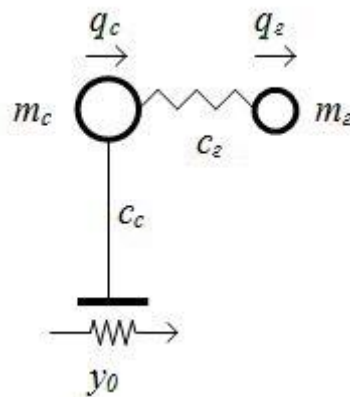


Рисунок 1 – Расчетная схема для анализа работы системы с ДГК

Figure1 – Scheme for the selection of TMD parameters

Для описания системы используются безразмерные параметры:

относительная масса – $\nu = \frac{m_2}{m_c}$, где m_2 – масса ДГК, m_c – масса сооружения;

настройка – $f = \frac{k_2}{k_c}$, где $k_2 = \sqrt{\frac{c_2}{m_2}}$ – парциальная частота ДГК, $k_c = \sqrt{\frac{c_c}{m_c}}$ – парциальная

частота сооружения, здесь c_2 – жесткость связи ДГК, c_c – жесткость сооружения.

Тогда матрица инерции и матрица жесткости исследуемой системы соответственно примут вид:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \nu \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 + \nu \cdot f^2 & -\nu \cdot f^2 \\ -\nu \cdot f^2 & \nu \cdot f^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

В качестве параметров, учитывающих гистерезисное затухание, используются коэффициенты неупругого сопротивления в связи ДГК γ_2 и в сооружении γ_0 .

В классических работах в защищаемом сооружении и в связи ДГК с сооружением используется для учета сил линейного сопротивления, пропорционального скорости, коэффициент вязкого сопротивления b . Потери энергии в связи ДГК с сооружением вызваны силами сопротивления, которые могут иметь сложную природу возникновения. В инженерных расчетах силы сопротивления различной природы возникновения часто заменяют вязким сопротивлением, пропорциональным скорости. Соответствующие формулы приведены, например, в [8]. Такая сила сопротивления пропорциональна взаимной (относительной) скорости точек системы, между которыми расположен демпфирующий элемент. Эти силы сопротивления являются частотно зависимыми, т.е. сила сопротивления пропорциональна частоте при гармонических колебаниях системы. В то же время, внутренне трение в материале является частотно независимым и, строго говоря, не может быть описано силами сопротивления пропорциональными скорости. Этой проблеме посвящено значительное количество публикаций [1, 2, 9 – 13 и др.]. Для описания внутреннего трения в материале широко используются следующие гипотезы: гипотеза Сороки – Сорокина [9, 13], гипотеза Релея, гипотеза Фойхта-Резникова-Цейтлина [10, 11] и гипотеза о пропорциональности модального демпфирования энергии, соответствующей форме колебаний.

Гипотеза Сороки – Сорокина

Согласно данной гипотезе, предложенной и развитой в работах канадского специалиста В. Сороки [13] и российского специалиста Е.С. Сорокина [9], сила сопротивления Q одномассового осциллятора пропорциональна жесткости системы и описывается соотношением

$$Q = -b_c \tilde{y}, \quad (2)$$

здесь \tilde{y} определяется следующим образом: если $y = \sum_i C_i \cos \omega_i t + S_i \sin \omega_i t$, то

$$\tilde{y} = \sum_i -C_i \sin \omega_i t + S_i \cos \omega_i t$$

Коэффициент гистерезисного демпфирования b_c , определяющий силу сопротивления (2) выражают через коэффициент жесткости c :

$$b_c = \gamma c \quad (3)$$

Представление (3) может быть обобщено на матрицы демпфирования элементов. Для исследуемой системы матрица демпфирования, составленная в соответствии с гипотезой Сороки-Сорокина примет вид:

$$\mathbf{B}_c = \begin{pmatrix} \gamma_0 + \gamma_2 \cdot v \cdot f^2 & -\gamma_2 \cdot v \cdot f^2 \\ -\gamma_2 \cdot v \cdot f^2 & \gamma_2 \cdot v \cdot f^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Уравнение колебаний системы в этом случае примет стандартный вид:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B}_c \dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{R}\mathbf{Y} = -\mathbf{M}\mathbf{V}_p \ddot{y}_o \quad (5)$$

где \mathbf{Y} – вектор обобщенных координат, $\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} q_c \\ q_2 \end{pmatrix}$, \mathbf{V}_p – вектор проекций воздействия на направления обобщенных координат, \ddot{y}_o – ускорение колебаний основания.

Гипотеза Фойхта – Резникова – Цейтлина

Гипотеза Фойхта – Резникова – Цейтлина [1, 2, 10, 11] предполагает первоначальное построение матрицы демпфирования по гипотезе Сороки-Сорокина (4) с последующим переходом к матрице вязкого сопротивления \mathbf{B} по формуле:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_c \mathbf{X} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{X}^{-1}, \quad (6)$$

где \mathbf{X} – матрица собственных векторов матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$, т.е. недемпфированной системы, $\mathbf{K} = \sqrt{\Lambda}$ – спектр частот, Λ – матрица собственных чисел матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$. Уравнение колебаний системы в этом случае примет стандартный вид:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{R}\mathbf{Y} = -\mathbf{M}\mathbf{V}_p \ddot{y}_0 \quad (7)$$

Следует отметить, что матрица вязкого сопротивления \mathbf{B} , полученная по формуле (6), не является симметричной, что равносильно наличию в системе гироскопических членов.

Как известно [8,14-16], для системы с пропорциональным демпфированием, когда матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$, $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_c$ и $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}$ имеют одну и ту же систему собственных чисел и собственных векторов, уравнения (5) и (7) в главных координатах ξ_j записываются эквивалентными уравнениями

$$\ddot{\xi}_j + \gamma_j k_j^2 \dot{\xi}_j + k_j^2 \xi_j = -d_j \ddot{y}_0 \quad (8)$$

$$\ddot{\xi}_j + \gamma_j k_j \dot{\xi}_j + k_j^2 \xi_j = -d_j \ddot{y}_0 \quad (9)$$

здесь γ_j – элемент спектра демпфирования, k_j – элемент спектра частот, d_j – элемент матрицы $\mathbf{X}^{-1}\mathbf{V}_p$.

В общем случае ни уравнение (5), ни уравнение (7) не раскладываются по формам колебаний недемпфированной системы, так как $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$, $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_c$ и $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}$ не имеют одну и ту же систему собственных векторов. Их разложение по формам колебаний рассмотрено в ряде работ [17,18]. Эквивалентность уравнений (8) и (9) подразумевает равенство амплитуд при резонансе, т.е. отношение частоты возмущения ω к собственной частоте сооружения k равно $p = \omega/k = 1$. При этом предполагается, что вдали от резонанса затухание не влияет на колебания системы. В случае, если коэффициент неупругого сопротивления в системе $\gamma < 0.3$, это предположение вполне справедливо. Однако при $\gamma \geq 0.3$ это предположение не справедливо. Совпадение результатов при исследовании уравнений (8) и (9) наблюдается только при резонансе, т.е. $p = 1$. С уходом от резонанса решения уравнений различаются, и демпфирование начинает заметно влиять на картину колебаний.

Гипотеза о пропорциональности модального демпфирования энергии, соответствующей форме колебаний

Данный способ учета демпфирования используется во многих программных комплексах, когда демпфирование распространяется пропорционально энергии формы. В этом случае матрица жесткости разбивается на матрицы, определяющие вклад каждого элемента. Далее, для оценки модального демпфирования γ_j используется следующая формула:

$$\gamma_j = \frac{\sum \gamma^{(s)} \mathbf{x}_j^T \mathbf{R}^{(s)} \mathbf{x}_j}{\mathbf{x}_j^T \mathbf{R} \mathbf{x}_j} \quad (10)$$

здесь x_j – j -ый собственный вектор недемпфированной системы, $\mathbf{R}^{(s)}$ – фрагмент матрицы жесткости, обусловленный s элементом системы; $\gamma^{(s)}$ – коэффициент неупругого сопротивления s элемента системы.

По найденным модальным затуханиям легко восстановить матрицу демпфирования.

$$\mathbf{B} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{X}^{-1} \quad (11)$$

Уравнение колебаний в этом случае имеет вид (7).

Отметим, что все рассмотренные методы позволяют учесть параметры затухания в каждом элементе системы. При этом только последний из рассмотренных методов приводит к пропорциональному демпфированию, т.е. разложению матрицы демпфирования по собственным векторам матрицы жесткости.

Обсуждение результатов

Для анализа результатов рассмотрено две системы с малым демпфированием в основной системе $\gamma_0=0.05$ (стальная конструкция на скальном основании) и с большим демпфированием $\gamma_0=0.35$. Это может быть сооружение из грунтовых материалов, или жесткое сооружение на слабых грунтах [8].

Для расчетов принято два случая: первый – относительная масса $v=0.1$, второй – относительная масса $v=1$.

Для каждой из систем рассматривается учет сил сопротивления с помощью следующих моделей:

- 1) затухание по Е.С. Сорокину в сооружении и пружине ДГК [19];
- 2) вязкое затухание, эквивалентное гистерезисному в сооружении и пружине ДГК [19];
- 3) гистерезисное затухание в сооружении и пружине ДГК и дополнительное вязкое затухание в связи между гасителем и сооружением [19];
- 4) задание демпфирования пропорционально энергии формы.

Оптимальные параметры ДГК подбираются таким образом, чтобы минимизировать пики на амплитудно-частотных характеристиках (АЧХ) при гармоническом возбуждении. Результаты расчетов приведены на рисунках и в таблицах.

Как видно из табл. 1 и рис. 2, при малой массе ДГК (относительная масса $v=0.1$) первые три способа учета сил сопротивления дают близкие результаты, в то время как оптимальные параметры затухания, подобранные по четвертой модели, значительно отличаются и эффективность ДГК в этом случае оказывается выше.

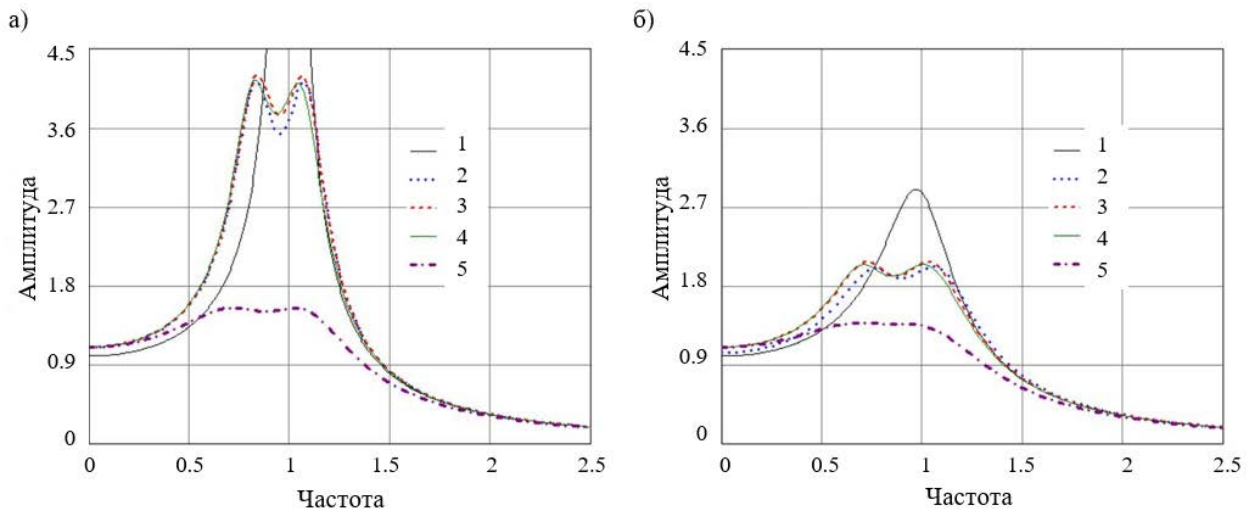


Рисунок 2 – Амплитудно-частотные характеристики системы с ДГК малой массы

а) при коэффициенте неупругого сопротивления в сооружении $\gamma_0=0.05$

б) при коэффициенте неупругого сопротивления в сооружении $\gamma_0=0.35$

- 1 – АЧХ незащищенной системы; 2 – АЧХ системы с ДГК при учете затухания по Е.С. Сорокину в сооружении и пружине ДГК; 3 – АЧХ системы с ДГК с учетом вязкого затухания, эквивалентного гистерезисному в сооружении и пружине ДГК; 4 – АЧХ системы с ДГК с учетом гистерезисного затухания в сооружении и пружине ДГК и дополнительного вязкого затухания в связи между гасителем и сооружением; 5 – АЧХ системы с ДГК с заданием демпфирования пропорционально энергии формы.

Figure 2 – Amplitude-frequency characteristics (AFC) of a system with low-mass TMD

a) with the coefficient of inelastic resistance in the structure $\gamma_0=0.05$

b) with the coefficient of inelastic resistance in the structure $\gamma_0=0.35$

- 1 – AFC of the unprotected system; 2 – AFC of the system with TMD taking into account the damping according to E.S. Sorokin in the building and the spring of the TMD; 3 – AFC of the system with TMD, taking into account the viscous damping, which is equivalent to the hysteresis in the structure and the TMD spring; 4 – AFC of the system with TMD taking into account the hysteresis damping in the structure and the TMD spring and additional viscous damping in connection between the damper and the structure; 5 – AFC of the system with TMD setting the damping in proportion to the shape mode energy.

Таблица 1 – Оптимальные параметры и эффективность ДГК малой массы (относительная масса $\nu=0.1$) при различных моделях учета затухания

Table 1 – Optimal parameters and efficiency of low-mass DHA (relative mass $\nu=0.1$) for various attenuation consideration models

Коэффициент неупругого сопротивления в сооружении, γ_0	Модель учета затухания	Оптимальная настройка ДГК, f	Оптимальный коэффициент неупругого сопротивления в связи с ДГК, γ_{nd}	Эффективность ДГК, %
0.05	по Е.С. Сорокину в сооружении и пружине ДГК	0.875	0.405	79
	вязкое затухание, эквивалентное гистерезисному в сооружении и пружине ДГК	0.91	0.4	79
	гистерезисное затухание в сооружении и пружине ДГК и дополнительное вязкое затухание в связи между гасителем и сооружением	0.88	0.405	79
	задание демпфирования пропорционально энергии формы	0.884	1.1	92
0.35	по Е.С. Сорокину в сооружении и пружине ДГК	0.79	0.53	29
	вязкое затухание, эквивалентное гистерезисному в сооружении и пружине ДГК	0.81	0.46	27
	гистерезисное затухание в сооружении и пружине ДГК и дополнительное вязкое затухание в связи между гасителем и сооружением	0.775	0.48	28
	задание демпфирования пропорционально энергии формы	0.845	1.1	52

Из табл. 2 и рис. 3 видно, что при большой массе ДГК (относительная масса $\nu=1$) для четырех различных моделей учета затухания результат подбора параметров ДГК получается различным, как по подбору оптимальных параметров, так и по снижению смещений защищаемого сооружения. Это связано с тем, что оптимальное затухание в пружине гасителя с ростом относительной массы становится значительным. Соответственно, необходимо более точно выбирать модель учета затухания.

При сравнении данных таблиц 1 и 2 при малом затухании в сооружении увеличение массы ДГК приводит к увеличению эффективности (в среднем увеличивается на 6%), а в случае, когда в защищаемом объекте значительное затухание, увеличение массы ДГК в некоторых случаях не значительно влияет на его эффективность. А в случае учета затухания, как вязкого, эквивалентного гистерезисному в сооружении и пружине ДГК, эффективность гасителя большой массы оказывается ниже, чем малой.

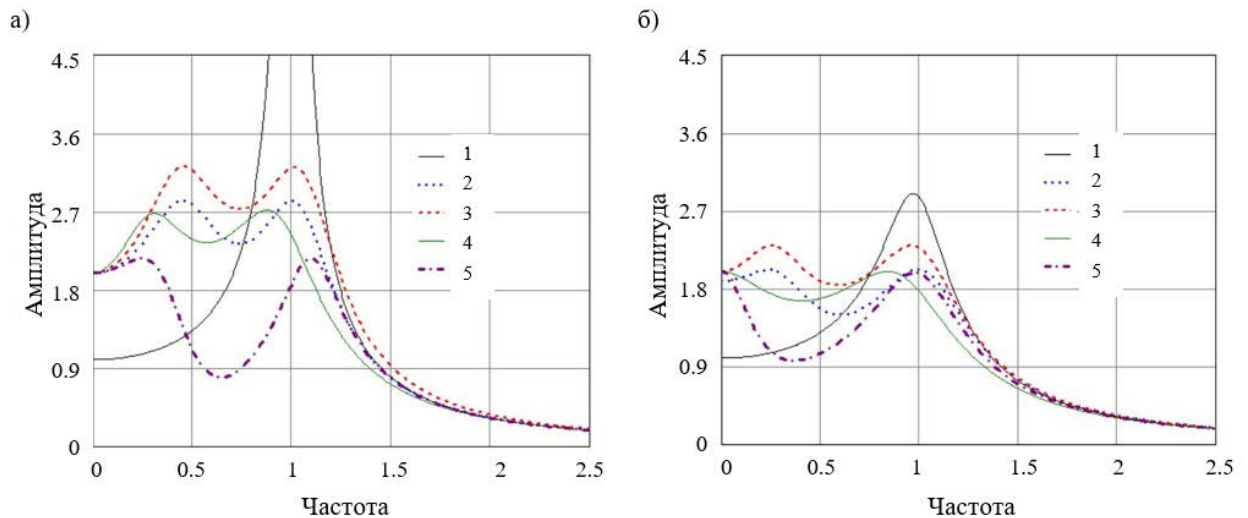


Рисунок 3 – Амплитудно-частотные характеристики системы с ДГК большой массы

а) при коэффициенте неупругого сопротивления в сооружении $\gamma_0=0.05$

б) при коэффициенте неупругого сопротивления в сооружении $\gamma_0=0.35$

- 1 – АЧХ незащищенной системы; 2 – АЧХ системы с ДГК при учете затухания по Е.С. Сорокину в сооружении и пружине ДГК; 3 – АЧХ системы с ДГК с учетом вязкого затухания, эквивалентного гистерезисному в сооружении и пружине ДГК; 4 – АЧХ системы с ДГК с учетом гистерезисного затухания в сооружении и пружине ДГК и дополнительного вязкого затухания в связи между гасителем и сооружением; 5 – АЧХ системы с ДГК с заданием демпфирования пропорционально энергии формы.

Figure 3 – Amplitude-frequency characteristics (AFC) of a system with large-mass TMD

a) with the coefficient of inelastic resistance in the structure $\gamma_0=0.05$

b) with the coefficient of inelastic resistance in the structure $\gamma_0=0.35$

- 1 – AFC of the unprotected system; 2 – AFC of the system with TMD taking into account the damping according to E.S. Sorokin in the building and the spring of the TMD; 3 – AFC of the system with TMD, taking into account the viscous damping, which is equivalent to the hysteresis in the structure and the TMD spring; 4 – AFC of the system with TMD taking into account the hysteresis damping in the structure and the TMD spring and additional viscous damping in connection between the damper and the structure; 5 – AFC of the system with TMD setting the damping in proportion to the shape mode energy.

Таблица 2 – Оптимальные параметры и эффективность ДГК большой массы (относительная масса $\nu=1$) при различных моделях учета затухания

Table 2 – Optimal parameters and efficiency of high-mass DHA (relative mass $\nu=0.1$) for various attenuation consideration models

Коэффициент неупругого сопротивления в сооружении, γ_0	Модель учета затухания	Оптимальная настройка ДГК, f	Оптимальный коэффициент неупругого сопротивления в связи с ДГК, γ_{nd}	Эффективность ДГК, %
0.05	по Е.С. Сорокину в сооружении и пружине ДГК	0.325	2.59	86
	вязкое затухание, эквивалентное гистерезисному в сооружении и пружине ДГК	0.525	1.165	84
	гистерезисное затухание в сооружении и пружине ДГК и дополнительное вязкое затухание в связи между гасителем и сооружением	0.33	1.22	86
	задание демпфирования пропорционально энергии формы	0.446	1.2	89
0.35	по Е.С. Сорокину в сооружении и пружине ДГК	0.15	6.49	29
	вязкое затухание, эквивалентное гистерезисному в сооружении и пружине ДГК	0.345	1.37	20
	гистерезисное затухание в сооружении и пружине ДГК и дополнительное вязкое затухание в связи между гасителем и сооружением	0.08	3.485	30
	задание демпфирования пропорционально энергии формы	0.24	2.2	30

Для более детального исследования причин, с которыми связаны различия в подборе параметров ДГК, исследуется система с гасителем малой массы $\nu=0.05$ при демпфировании в системе близком к пропорциональному ($\gamma_c=0.05$ и $\gamma_r=0.1$) и при непропорциональном демпфировании $\gamma < 0.3$ ($\gamma_c=0.05$ и $\gamma_r=0.295$) при прочих равных параметрах. Результаты расчета приведены на рисунке 4.

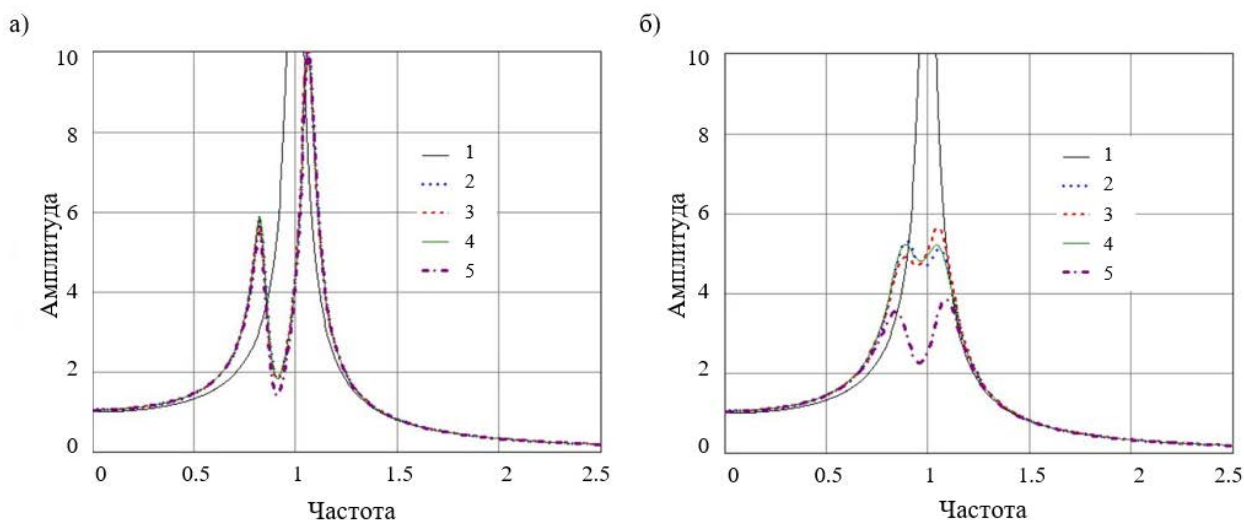


Рисунок 4 – Амплитудно-частотные характеристики системы с ДГК малой массы $\nu=0.05$

а) демпфирование в системе, близкое к пропорциональному: $\gamma_c=0.05$ и $\gamma_r=0.1$

б) при непропорциональном демпфировании $\gamma < 0.3$: $\gamma_c=0.05$ и $\gamma_r=0.295$

- 1 – АЧХ незащищенной системы; 2 – АЧХ системы с ДГК при учете затухания по Е.С. Сорокину в сооружении и пружине ДГК; 3 – АЧХ системы с ДГК с учетом вязкого затухания, эквивалентного гистерезисному в сооружении и пружине ДГК; 4 – АЧХ системы с ДГК с учетом гистерезисного затухания в сооружении и пружине ДГК и дополнительного вязкого затухания в связи между гасителем и сооружением; 5 – АЧХ системы с ДГК с заданием демпфирования пропорционально энергии формы.

Figure 4 – Amplitude-frequency characteristics (AFC) of a system with low-mass TMD $\nu=0.05$

a) with the coefficient of inelastic resistance $\gamma_c=0.05$ и $\gamma_r=0.1$

b) with the coefficient of inelastic resistance $\gamma_c=0.05$ и $\gamma_r=0.295$

- 1 – AFC of the unprotected system; 2 – AFC of the system with TMD taking into account the damping according to E.S. Sorokin in the building and the spring of the TMD; 3 – AFC of the system with TMD, taking into account the viscous damping, which is equivalent to the hysteresis in the structure and the TMD spring; 4 – AFC of the system with TMD taking into account the hysteresis damping in the structure and the TMD spring and additional viscous damping in connection between the damper and the structure; 5 – AFC of the system with TMD setting the damping in proportion to the shape mode energy.

Из рисунка 4а видно, что при затухании в системе, близком к пропорциональному все четыре модели дают близкий результат. При дальнейшем увеличении различия в параметрах затухания между сооружением и элементами ДГК результат сильно различается между первыми тремя моделями и четвертой (демпфирование пропорциональное энергии по форме). Как видно из рисунка 4б даже при незначительной массе $\nu=0.05$ и затухании в системе $\gamma < 0.3$, если в системе непропорциональное демпфирование, то результат значительно отличается в случае задания демпфирования пропорциональным энергии по формам. Амплитуда колебаний при использовании модели учета демпфирования пропорционального энергии по формам колебаний получается меньше по сравнению с амплитудами, полученным при учете демпфирования по другим моделям. Из таблицы 3 становится ясно, что это связано с видом спектров демпфирования, полученных при различных моделях учета затухания в системе.

Таблица 3 – Спектры демпфирования системы с ДГК малой массы ($\nu=0.05$) при различных моделях учета затухания

Table 2 – Optimal parameters and efficiency of low-mass DHA (relative mass $\nu=0.05$) for various attenuation consideration models

Модель учета затухания			
по Е.С. Сорокину в сооружении и пружине ДГК	вязкое затухание, эквивалентное гистерезисному в сооружении и пружине ДГК	гистерезисное затухание в сооружении и пружине ДГК и дополнительное вязкое затухание в связи между гасителем и сооружением	задание демпфирования пропорционально энергии формы
демпфирование в системе близкое к пропорциональному: $\gamma_c=0.05$ и $\gamma_r=0.1$ (рис. 4а)			
$\begin{pmatrix} 0.064 & -0.016 \\ -0.033 & 0.086 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.064 & -0.016 \\ -0.033 & 0.086 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.067 & -0.015 \\ -0.039 & 0.084 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.064 & 0 \\ 0 & 0.086 \end{pmatrix}$
непропорциональное демпфирование $\gamma < 0.3$: $\gamma_c=0.05$ и $\gamma_r=0.295$ (рис. 4б)			
$\begin{pmatrix} 0.149 & -0.103 \\ -0.14 & 0.196 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.149 & -0.103 \\ -0.14 & 0.196 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.165 & -0.095 \\ -0.162 & 0.185 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.149 & 0 \\ 0 & 0.196 \end{pmatrix}$

При учете сил сопротивления по первым трем моделям в спектрах демпфирования побочные элементы соизмеримы с элементами главной диагонали и соответственно вносят значительный вклад в результирующие смещения, показанные на АЧХ (рис. 4). В то время, как при учете сил сопротивления по четвертой модели дает диагональный спектр демпфирования по построению, в результате чего амплитуды имеют значения меньше. Четвертая модель по своей идее построения матрицы демпфирования не учитывает перевязки форм. А в некоторых системах, в частности в системах с ДГК, корреляция форм колебаний значительно влияет на результат, и чем больше затухание в системе, тем значительнее влияние на результат. Исходя из сказанного можно сделать вывод, что результаты, полученные при учете затухания пропорционального энергии форм колебаний, не идут в запас и могут быть неверными.

Заключение

В статье было рассмотрено четыре модели учета затухания:

- затухание по Е.С. Сорокину в сооружении и пружине ДГК;
- вязкое затухание, эквивалентное гистерезисному в сооружении и пружине ДГК;
- гистерезисное затухание в сооружении и пружине ДГК и дополнительное вязкое затухание в связи между гасителем и сооружением;
- задание демпфирования пропорционально энергии формы.

Перечисленные модели учета затухания были рассмотрены для двух систем: с малым демпфированием в основной системе $\gamma_0=0.05$ (2.5% критического) и с большим демпфированием $\gamma_0=0.35$ (17.5% критического). Для каждой из систем задавался гаситель с относительной массой $\nu=0.1$ и гаситель большой массы с $\nu=1$. Для рассмотренных систем можно сделать следующие выводы:

1. Оптимизация параметров ДГК существенно зависит от относительной массы ДГК и затухании в защищаемом сооружении. При относительной массе гасителя $\nu > 0.5$, оптимальное демпфирование в пружине ДГК существенно возрастает.
2. Вид модели учета сил сопротивления значительно влияет на подбор оптимальных параметров ДГК и на его расчетную эффективность. При этом чем больше затухание в защищаемом сооружении, тем значительнее различия в эффективности и оптимальных параметрах ДГК, т.е. тем аккуратнее следует подходить к моделированию демпфирования в элементах ДГК.
3. Эффективность ДГК при задании демпфирования пропорционально энергии формы оказывается значительно выше эффективности, получаемой по остальным моделям. Этот результат идет не в запас, т.к. модель по построению не учитывает перевязки форм, которая в случае системы с ДГК вносит значительный вклад в результат.

Список литературы

1. Савинов О.А. О применении динамического гасителя колебаний // Труды научно-исслед. сектора л.о. треста глубинных работ. Л.: Стройиздат Наркомстроя. 1940. Вып. 1. С. 30 – 35.
2. Корнев Б.Г., Резников Л.М. Динамические гасители колебаний. М.: Наука. 1988. 303 с.
3. Сахарова В.В., Симкин А.А., Никитин А.А., Уздин А.М. Использование пролетного строения для гашения сейсмических колебаний опор мостов // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. 1982. Вып. 4. С. 14 – 18.
4. Уздин А.М., Елизаров С.В., Белаш Т.А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта. Москва: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2012. 501 с.
5. Никитин А.А., Уздин А.М. Применение динамических гасителей колебаний для сейсмозащиты мостов // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. 1986. Вып. 9. С. 20 – 24.
6. Цейтлин А.И., Ким Л.И. Сейсмические колебания многоэтажного здания с «гибким» верхним этажом. Снижение материалоемкости и трудоемкости сейсмостойкого строительства. Тезисы докладов Всесоюзного совещания. М.: Стройиздат.1982. С. 85.
7. Нестерова О.П., Уздин А.М. Особенности работы динамических гасителей колебаний при силовом и кинематическом возмущении демпфированных сооружений // Известия российской Академии ракетных и артиллерийских наук. Москва. 2016. Вып. 2(92). С. 84 – 89.
8. Полоротова Н.А., Нестерова О.П., Уздин А.М. Задание демпфирующих характеристик динамических систем и построение матрицы демпфирования // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 6. С.40 – 49.
9. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Гос. изд. по строит., арх. и строит. материалам. 1960. 129 с.
10. Цейтлин А.И. Об учете внутреннего трения в нормативных документах по динамическому расчету сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 1981. № 4. С. 33 – 38.
11. Резников А.М. Эквивалентная модель многомассовой системы с вязким и частотно-независимым внутренним трением // Строительная механика и расчет сооружений. 1979. № 4. С.44 – 48.
12. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Физматгиз. 1960. 193 с.

13. Soroka W.W. Note on the relations between viscous and structural damping coefficients. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1949, no. 16, p. 409
14. Durseneva N.V., Indeykin A.V., Kuznetsova I.O., Uzdin A.M., Fedorova M.Yu. Peculiarities of Calculating Bridges with Seismic Isolation Including Spherical Bearings and Hydraulic Dampers in Russia. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2015, volume 9, no. 4, pp. 401 – 409
15. Skinner R.I., Robinson W.H., McVerry G.H. An introduction to seismic isolation. New Zealand. John Wiley & Sons, 1993, 353 p.
16. Soydan C., Gullu A., Hepbostanci O.E., Yuksel E., Irtem E. Design of a Special Lead Extrusion Damper. Conference: 15th World Conference on Earthquake Engineering At Lisboa, Portugal, 2012, Volume 15.
17. Vorobyova K.V., Nesterova O.P., Uzdin A.M., Nikonova N.V., Fedorova M.Yu. Taking account of damping in estimating structure earthquake stability. *Materials Physics and Mechanics*. 2016, no. 26, pp.57 – 60.
18. Нестерова О.П., Уздин А.М., Федорова М.Ю. Метод расчета сильно демпфированных систем с непропорциональным демпфированием // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 5(81). С. 64 –72.
19. Нестерова О.П., Уздин А.М., Федорова М.Ю. Влияние способа учета демпфирования на оптимизацию параметров динамического гасителя колебаний // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2021. № 6. С. 29 – 44.

References

1. Savinov O.A. O primeneniі dinamicheskogo gasitelya kolebaniy. Trudy nauchno-issled. sektora I.o. tresta glubinnyykh rabot. L.: Strojizdat Narkomstroya. 1940. Vyp. 1, pp. 30 – 35.
2. Korenev B.G., Reznikov L.M. Dinamicheskie gasiteli kolebaniy. M.: Nauka. 1988. 303 p.
3. Sakharova V.V., Simkin A.A., Nikitin A.A., Uzdin A.M. Ispol'zovanie proletnogo stroeniya dlya gasheniya sejsmicheskikh kolebaniy opor mostov. *Ehkspres-informatsiya VNIIS. Ser.14. Sejsmostojkoe stroitel'stvo*. 1982, Vyp. 4, pp. 14 – 18.
4. Uzdin A.M., Elizarov S.V., Belash T.A. Sejsmostojkie konstrukcii transportnykh zdaniy i sooruzhenij: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov zheleznodorozhnogo transporta. Moskva: FGBOU «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte». 2012. 501 p.
5. Nikitin A.A., Uzdin A.M. Primenenie dinamicheskikh gasitelej kolebaniy dlya sejsmozashchity mostov. *Ehkspres-informaciya VNIIS. Ser.14. Sejsmostojkoe stroitel'stvo*. 1986, Vyp. 9, pp. 20 – 24.
6. Cejtlin A.I., Kim L.I. Sejsmicheskie kolebaniya mnogoehfaznogo zdaniya s «gibkim» verkhnim ehtazhom. Snizhenie materialoemkosti i trudoemkosti sejsmostojkogo stroitel'stva. Tezisy dokladov Vsesoyuznogo soveshchaniya. M.: Strojizdat.1982, p. 85.
7. Nesterova O.P., Uzdin A.M. Osobennosti raboty dinamicheskikh gasitelej kolebaniy pri silovom i kinematicheskom vozmushchenii dempfirovannykh sooruzhenij. *Izvestiya rossijskoj Akademii raketnykh i artillerijskikh nauk*. Moskva. 2016, Vyp. 2(92), pp. 84 – 89.
8. Polorotova N.A., Nesterova O.P., Uzdin A.M. Zadanie dempfiruyushchikh kharakteristik dinamicheskikh sistem i postroenie matricy dempfirovaniya. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2019, no. 6, pp.40 – 49.
9. Sorokin E.S. K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyakh uprugikh sistem. M.: Gos. izd. po stroit., arkh. i stroit. materialam. 1960. 129 p.
10. Cejtlin A.I. Ob uchete vnutrennego treniya v normativnykh dokumentakh po dinamicheskomu raschetu sooruzhenij. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 1981, no. 4, pp. 33 – 38.

11. Reznikov A.M. Ekvivalentnaya model' mnogomassovoj sistemy s vyazkim i chastotno-nezavisimym vnutrennim treniem . *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 1979, no. 4, pp. 44 – 48.
12. Panovko Ya.G. Vnutrennee trenie pri kolebaniyakh uprugikh sistem. M.: Fizmatgiz. 1960. 193 p.
13. Soroka W.W. Note on the relations between viscous and structural damping coefficients. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1949, no. 16, p. 409
14. Durseneva N.V., Indeykin A.V., Kuznetsova I.O., Uzdin A.M., Fedorova M.Yu. Peculiarities of Calculating Bridges with Seismic Isolation Including Spherical Bearings and Hydraulic Dampers in Russia. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2015, volume 9, no. 4, pp. 401 – 409
15. Skiner R.I., Robinson W.H., McVerry G.H. An introduction to seismic isolation. New Zealand. John Wiley & Sons, 1993, 353 p.
16. Soydan S., Gullu A., Hepbostanci O.E., Yuksel E., Irtem E. Design of a Special Lead Extrusion Damper. Conference: 15th World Conference on Earthquake Engineering At Lisboa, Portugal, 2012, Volume 15.
17. Vorobyova K.V., Nesterova O.P., Uzdin A.M., Nikonova N.V., Fedorova M.Yu. Taking account of damping in estimating structure earthquake stability. *Materials Physics and Mechanics*. 2016, no. 26, pp. 57 – 60.
18. Nesterova O.P., Uzdin A.M., Fedorova M.Yu. Metod rascheta sil'no dempfirovannykh sistem s neproporcional'nym dempfirovaniem. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. 2018, no. 5(81), pp. 64 – 72.
19. Nesterova O.P., Uzdin A.M., Fedorova M.YU. Vliyanie sposoba ucheta dempfirovaniya na optimizaciyu parametrov dinamicheskogo gasitelya kolebanij. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2021, no. 6, pp. 29 – 44.

Данные об авторе / Information about author

Нестерова Ольга Павловна, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ). Санкт-Петербург, Российская Федерация

Olga P. Nesterova, PhD, associate professor, “Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering” (SPbGASU). Saint-Petersburg, Russian Federation

УДК 69.033.8

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-23-33](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-23-33)

Теоретические и экспериментальные исследования

Коэффициент динамичности модульных зданий при сейсмическом воздействии

Широков В.С.¹

¹АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

Аннотация: Строительство модульных зданий является актуальным направлением исследований в настоящее время. При возведении модульных зданий в труднодоступных районах отдельное внимание следует уделять рассмотрению сейсмических воздействий. При этом в Российской Федерации имеется не так много исследований, посвященных работе модульных зданий во время динамических воздействий.

В данной статье изучается влияние параметров модульных зданий на коэффициенты динамичности при сейсмическом воздействии. Для исследования влияния жесткостей элементов на коэффициент динамичности использована аналитическая формула определения периода собственных колебаний, полученная для модульных зданий с опорными стойками, жесткими внутримодульными и шарнирными межмодульными соединениями. На основе граничных значений моментов инерции стоек, при которых происходит уменьшение коэффициента динамичности, произведена оценка реальных конструктивных решений при различных соотношениях моментов инерции ригеля и стойки одно-, двух- и трехэтажных модульных зданий. Размеры модулей приняты $3 \times 6 \times 3(h)$ м, нагрузка на перекрытие – 100 кг/м^2 и 150 кг/м^2 .

Выявлено, что при грунтовых условиях III и IV категории практически все рассмотренные конструктивные решения модульных зданий имеют коэффициент динамичности, равный 2,5 даже для трехэтажных зданий. При грунтовых условиях I и II категории наблюдается снижение коэффициента динамичности некоторых конструктивных решений для зданий выше двух этажей. При любых грунтовых условиях для одноэтажных модульных зданий коэффициент динамичности равен 2,5. Наиболее неудачным решением с точки зрения сейсмического воздействия является такое, при котором отношение моментов инерции ригеля и стойки меньше единицы.

Ключевые слова: модульные здания, сейсмическое воздействие, коэффициент динамичности, период колебаний

Для цитирования: Широков В.С. Коэффициент динамичности модульных зданий при сейсмическом воздействии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 4. С. 23-33 DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-23-33](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-23-33)

Theoretical and experimental studies

Dynamic coefficient of modular buildings during seismic load

V.S. Shirokov¹

¹JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation

@ В.С. Широков, 2022

Abstract: Modular buildings are currently a topical area of research. Erection of modular buildings in hard-to-reach areas needs special attention to the consideration of seismic loads. There are not many studies on the work of modular buildings on dynamic impacts in the Russian Federation.

The paper studies the influence of the parameters of modular buildings to the coefficients of dynamic during seismic action. Study of the influence of the elements flexibility on the coefficient of dynamic, an analytical formula for determining the period of natural oscillations was used. This formula was obtained for modular buildings with corner supported columns, rigid intramodular and pin intermodular connections. Based on the boundary values of the moments of inertia of the columns, at which the dynamic coefficient decreases, an assessment of real design solutions was made for various ratios of the moments of inertia of crossbars and columns of one-, two- and three-story modular buildings. The dimensions of the modules are set to be $3 \times 6 \times 3(h)$ m, the dead load on a floor is 100 kg/m^2 and 150 kg/m^2 .

It was found almost all considered design solutions for modular buildings have a dynamic coefficient is 2,5 even for three-story buildings if there is ground categories III and IV. Dynamic coefficient decreases for some two-story buildings if there is ground categories I and II. Dynamic coefficient of one-story buildings is 2,5 for any ground categories. The ratio less than 1 of the moments of inertia of the crossbar and the column is the worst case of design in terms of seismic load.

Keywords: Modular buildings, seismic load, coefficient of dynamic, structural period

For citation: V.S. Shirokov Dynamic coefficient of modular buildings during seismic load. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 4, pp. 23-33

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-23-33](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-23-33)

Введение

Модульное строительство в настоящее время является активно развивающимся направлением во всем мире. Модульные здания широко внедряются в практику строительства в Российской Федерации. При этом, за счет своих преимуществ, таких как кратчайшие сроки, простота возведения объекта и всесезонность монтажа, модульные здания особо целесообразно применять в труднодоступных регионах [1, 2, 3]. В статье [4] отмечается, что для арктической зоны классические технологии строительства (железобетон и кладка) невыгодны с экономической точки зрения, а наиболее предпочтительным является именно модульное строительство.

Одними из главных проблем строительства в труднодоступных регионах с точки зрения строительных конструкций являются значительные ветровые и сейсмические воздействия. В отечественной литературе на данный момент имеется не так много исследований работы модульных зданий при сейсмическом воздействии. Вашпанов К.С. [5] рассматривает вопрос сейсмической устойчивости одноэтажного объемно-модульного здания, как системы с одной степенью свободы, т.е., сам блок считается недеформируемым. На базе НИУ МГСУ были проведены экспериментальные исследования на сейсмическое воздействие полноразмерного двухэтажного фрагмента модульного здания, изготовленного по технологии «Кнауф» [6], согласно полученным результатам сейсмостойкость рассмотренного здания обеспечена при землетрясениях интенсивностью 7–9 баллов.

Из зарубежных авторов можно отметить Annan C.D., Youssef M.A. и El-Naggar M.H. [7-9]. По результатам модального анализа двух-, четырех- и шестиэтажного модульных зданий [9] было установлено, что основная реакция происходит при первой

частоте собственных колебаний. Shi F. с соавторами [10] рассматривают двадцатипятиэтажное здание с разными компоновками модулей в плане. Shi F. отмечает, что следует стремиться к симметричному расположению модулей. Lasey A.W. в работах [11-13] проводит исследования влияния высоты здания на частоты собственных колебаний. Alembagheri M. с соавторами рассматривал влияние стенового заполнения на динамические характеристики модулей [14]. По результатам исследований авторами установлено, что серьезно влияет на частоты собственных колебаний только полное стеновое заполнение, в случае частичного заполнения частоты изменялись незначительно по сравнению с модулями без стен.

Целью данной статьи является изучение влияния параметров модульных зданий на коэффициенты динамичности при сейсмическом воздействии.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

1. Оценены основные конструктивные особенности модульных зданий.
2. Предложена аналитическая формула для выявления границ значений моментов инерции стоек, при которых коэффициенты динамичности начинают убывать.
3. Оценены коэффициенты динамичности реальных конструктивных решений модульных зданий.

Методы исследования

В статье [15] показано, что для анализа модульных зданий на сейсмическое воздействие справедливо применять консольную расчетную модель сооружения, принятую в российских нормах. Согласно СП 14.13330.2018 коэффициент динамичности β_i , зависящий от периода собственных колебаний, изменяется в интервале от 0,8 до 2,5. При этом можно выделить три основных значения периодов колебаний: 0,1 с, 0,4 с и 0,8 с (рисунок 1). Периоды менее 0,1 с характерны очень жестким сооружениям, к которым модульные здания не относятся. При периодах колебаний от 0,1 с до 0,4 с или 0,8 (в зависимости от типа грунта) коэффициент динамичности имеет наибольшее значение, равное 2,5, т.е. это наиболее неудачные значения периодов с точки зрения сейсмического воздействия.

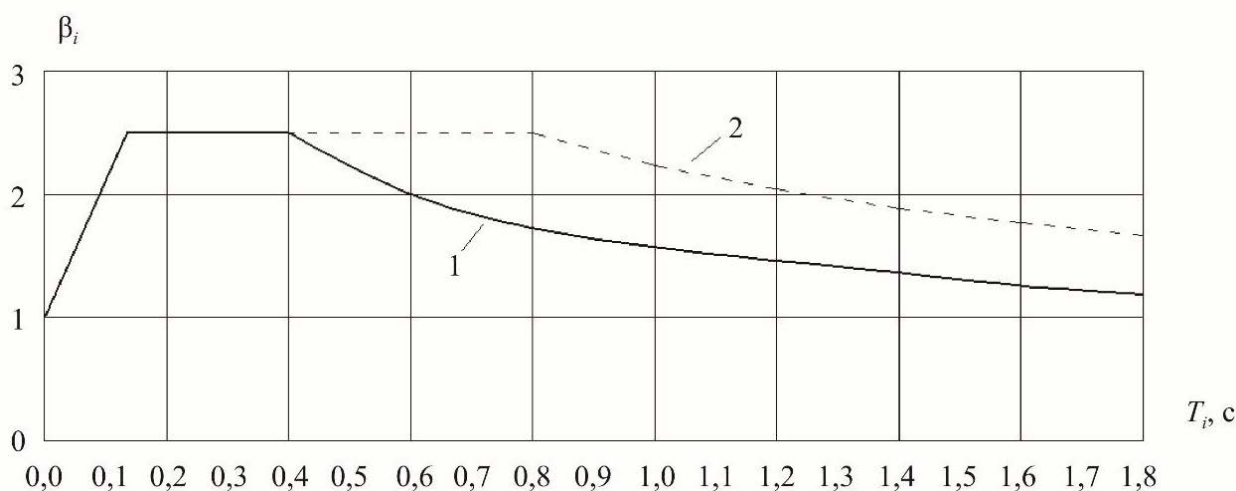


Рисунок 1 – График изменения коэффициента динамичности по СП 14.13330.2018: 1 – для грунтов I и II категории; 2 – для грунтов III и IV категории

Figure 1 – Graph of the dynamic coefficient change according to SP 14.13330.2018: 1 - for soils of categories I and II; 2 - for soils III and IV categories

В статьях [16, 17] предложена и обоснована формула определения первой частоты собственных колебаний модульного здания с опорными колоннами, которая для многоэтажных зданий имеет вид:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot E \cdot I_1 \cdot g}{c^2 \cdot G \cdot h^3 \cdot \left(1 + \frac{I_1 \cdot l_2}{I_2 \cdot h}\right)}} \quad (1)$$

где T – период колебаний;
 E – модуль упругости стали;
 I_1 – момент инерции стойки;
 I_2 – момент инерции ригеля;
 l_2 – пролет модуля в направлении определения моды колебаний;
 G – масса, собранная с перекрытия;
 c – количество этажей;
 h – высота модуля;
 g – ускорение свободного падения.

Формула (1) выведена исходя из следующих допущений:

1. Модули имеют одинаковое конструктивное решение.
2. Сечения верхнего и нижнего ригеля одинаковые.
3. Диск перекрытия (покрытия) не деформируется в своей плоскости.
4. Жесткость стенового ограждения не учитывается.
5. Сопряжение блоков с фундаментами считается шарнирно-неподвижным по углам модулей.
6. Сопряжение блоков друг с другом принято шарнирным в угловых точках горизонтальных рам.
7. Сопряжения всех элементов блока (стоек и горизонтальных рам) друг с другом принято жестким.

Анализируя формулу (1) видим, что значительное влияние на период колебаний здания оказывают геометрические параметры (сечения элементов, генеральные размеры) и масса модулей. Основную часть массы модулей составляют перекрытия, которые в современной строительной практике выполняются с применением эффективных материалов. Масса 1 м² перекрытия (p) обычно составляет 100÷150 кг/м², при отсутствии какого-либо тяжелого оборудования. Так как при увеличении массы период колебаний также увеличивается, то в рамках данной работы рассмотрены наихудшие варианты с минимальной массой.

Размеры модулей обуславливаются объемно-планировочными решениями, технологическими требованиями, а также нормативами на габаритные транспортные размеры, согласно которым максимальные размеры для крупногабаритных грузов составляют: по ширине 3,5 м; по длине 12 м; по высоте 3,9 м. Одним из наиболее распространенных размеров модуля является 3×6×3(h) м, который и был принят в данной статье. Таким образом, масса, собранная с перекрытия (G), составляет 900÷1350 кг.

Зависимость периода колебаний от сечений элементов удобно представить с помощью соотношения моментов инерции ригеля и стойки:

$$r = \frac{I_2}{I_1} \quad (2)$$

С учетом (2) можно преобразовать выражение (1):

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{c} \sqrt{\frac{G \cdot h^3 \cdot \left(1 + \frac{l_2}{r \cdot h}\right)}{24 \cdot E \cdot I_1 \cdot g}} \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что период колебаний зависит от высоты здания и жесткостей ригеля и стойки. Для выявления границ значений моментов инерции стоек, при которых коэффициенты динамичности начинают убывать, формулу (3) можно преобразовать:

$$I_1 = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot c^2 \cdot G \cdot h^3 \cdot \left(1 + \frac{l_2}{r \cdot h}\right)}{24 \cdot E \cdot g \cdot T^2} \quad (4)$$

Результаты исследования

При подстановке в формулу (4) значений периодов колебаний 0,4 с и 0,8 с, соответствующих разным типам грунта, можно получить граничные кривые, при которых коэффициент динамичности равен 2,5. Данные кривые представлены на рисунках 2 и 3 для грунтов I, II и III, IV категорий, соответственно, при нагрузках на перекрытия 100 кг/м² и 150 кг/м².

На графиках 2 и 3 пунктирная линия для одноэтажных зданий, штрих-пунктирная для двухэтажных, сплошная для трехэтажных. Для оценки коэффициентов динамичности реальных модульных зданий на графиках также отмечены значения, полученные на основе сечений элементов модулей из статей [18-26]. Параметры, а также вычисленные периоды колебаний рассмотренных модульных заданий приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры модульных зданий

Table 1 – Modular buildings parameters

Ссылка	Колонна	Балка	$I_1, \text{см}^4$	$I_2, \text{см}^4$	r	$T, \text{с}$		
						1 эт.	2 эт.	3 эт.
[18]	HSS200x100x6	C250x100x4	1703	1682	0,99	0,167	0,333	0,500
[19]	HSS150x150x8	RHS250x150x8	1411	4886	3,46	0,132	0,265	0,397
[20]	HSS125x125x6	C200x75x6	643	1179	1,83	0,226	0,452	0,678
[21]	HSS150x150x8	C250x140x10	1411	5048	3,58	0,132	0,263	0,395
[22]	HSS150x150x8	HSS150x150x8	1411	1411	1,00	0,183	0,365	0,548
[23]	HSS200x200x10	HSS200x200x8	4251	3566	0,84	0,112	0,223	0,335
[24, 25]	RHS150x100x6	C350x100x6	834	5481	6,57	0,157	0,313	0,470
[26]	Гн. уголок 160x4	Швеллер 16	453	747	1,65	0,277	0,553	0,830

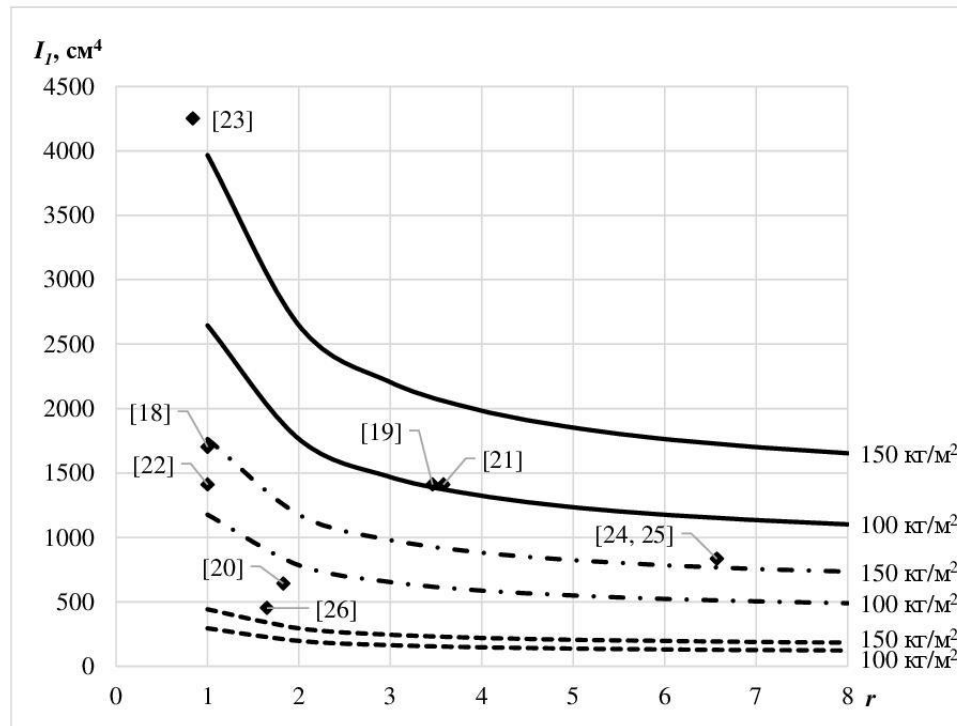


Рисунок 2 – График изменения момента инерции стойки, при котором происходит уменьшение коэффициента динамичности модульного здания для грунтов I и II категории

Figure 2 – Graph of the column moment of inertia change, at which there is a decrease in the coefficient of dynamism of modular growth for soils of categories I and II

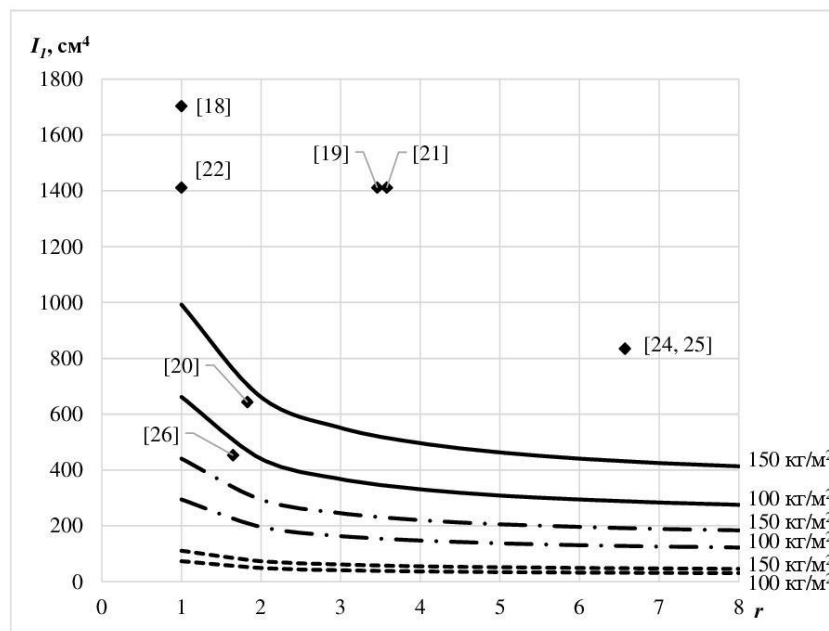


Рисунок 3 – График изменения момента инерции стойки, при котором происходит уменьшение коэффициента динамичности модульного здания для грунтов III и IV категории

Figure 3 – Graph of the column moment of inertia change, at which there is a decrease in the coefficient of dynamism of modular growth for soils of categories III and IV

Для модульных зданий с конструктивными решениями, которые находятся выше кривых, представленных на графиках 2 и 3, коэффициент динамичности равен 2,5. При грунтовых условиях III и IV категории практически все рассмотренные конструктивные решения модульных зданий располагаются выше кривой даже для трехэтажных зданий. При грунтовых условиях I и II категории наблюдается снижение коэффициента динамичности для двухэтажных зданий с решениями согласно [20, 26], для трехэтажных зданий с решениями согласно [18, 22, 24, 25]. При любых грунтовых условиях для одноэтажных модульных зданий коэффициент динамичности равен 2,5. Отдельно стоит отметить, что наиболее неудачным конструктивным решением является такое, при котором отношение жесткости ригеля к жесткости стойки (r) меньше единицы [23]. При $r < 1$ происходит довольно резкое увеличение минимального момента инерции стойки, при котором коэффициент динамичности меньше 2,5.

Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для одноэтажных модульных зданий при любых грунтовых условиях, а также при грунтовых условиях III и IV категории для зданий вплоть до трех этажей, коэффициент динамичности равен 2,5 в большинстве случаев.
2. При грунтовых условиях I и II категории имеются конструктивные решения модульных зданий выше двух этажей, для которых коэффициент динамичности меньше 2,5. Т.е., с точки зрения сейсмического воздействия многоэтажные модульные здания более предпочтительны.
3. Наиболее неудачное конструктивное решение – при котором соотношение моментов инерции ригеля и стойки меньше единицы. Следует проектировать модульные здания с более гибкими стойками и более жесткими ригелями, при выполнении требований по прочности, устойчивости и жесткости.

Список литературы

1. Бадьин Г.М., Сычев С.А. Анализ дефектов монтажа и эксплуатации быстровозводимых конструкций // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2–1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21019> (дата обращения: 01.08.2022)
2. Исходжанова Г.Р. Перспективы применения блочно-модульных структур зданий для условий высокогорья // *Вестник КPCУ*. 2013. Т. 13, № 7. С. 151 – 155.
3. Муксинов Р.М., Семенов В.С., Акбаралиев Р.Ш. Сейсмобезопасные, быстровозводимые и мобильные здания для жизнеобеспечения населения в чрезвычайных ситуациях // *Вестник КPCУ*. 2012. Т. 12. № 7. С. 110 –114.
4. Тимощенко А.А., Куправа Л.Р., Москалев М.Б., Чарник Д.Г. Особенности строительства модульных зданий в высоких широтах // *Вестник студенческого научного общества*. 2018. № 2. С. 154 –156.
5. Вашпанов К.С. Сейсмостойкость объемно-модульных зданий // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2012. № 4. С. 7–11.
6. Грановский А.В., Смирнов В.А., Федоров М.В., Сазонов А.С., Елутин А.М., Эр-Очир А. К оценке сейсмостойкости зданий, изготовленных по объемно-модульной технологии фирмы «Кнауф» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 2. С. 34 – 39. Doi: 10.33622/0869-7019.2020.02.34-39
7. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Experimental evaluation of the seismic performance of modular steel-braced frames. *Engineering Structures*. 2009, V. 31, pp. 1435–1446. Doi:10.1016/j.engstruct.2009.02.024

8. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2009, V. 13, pp. 1–21. Doi: 10.1080/13632460802212576
9. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Seismic vulnerability assessment of modular steel buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2009, V. 13, pp. 1065–1088. Doi: 10.1080/13632460902933881
10. Shi F., Wang H., Zong L., Ding Y., Su J. Seismic behavior of high-rise modular steel constructions with various module layouts. *Journal of Building Engineering*. 2020, v, 31, 101396. Doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101396
11. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load. *Engineering Structures*. 2020, V. 213, 110628. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628
12. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Numerical study of the structural response to wind loading: modular building case study. 13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures 31 January – 2 February 2018, Perth, Australia. 2018.
13. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural Response of Modular Buildings – An Overview. *Journal of Building Engineering*. 2018, V. 23, pp. 45–56. Doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.008
14. Alembagheri M., Sharafi P., Rashidi M., Bigdeli A., Farajian M. Natural dynamic characteristics of volumetric steel modules with gypsum sheathed LSF walls: Experimental study. *Structures*. 2021, V. 33, pp. 272–282. Doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.068
15. Shirokov V.S., Gordeeva T.E., Bocharov A.Yu. Analytic method of structural analysis of modular buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, V. 775, 012148. Doi:10.1088/1757-899X/775/1/012148
16. Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovjev A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building. *Procedia Engineering*. 2016, V. 153, pp. 655–661. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.218
17. Shirokov V., Soloviev A., Gordeeva T. Determining internal forces in modular building elements under action wind load. *MATEC Web of Conferences*. 2018, V. 196, 02010. Doi.org/10.1051/mateconf/201819602010
18. Cho B.-H., Lee J.-S., Kim H., Kim D.-J. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading. *Applied Sciences*. 2019, V. 9, 1929. Doi.org/10.3390/app9091929
19. Khan K., Yan J.-B. Numerical studies on the seismic behaviour of a prefabricated multi-storey modular steel building with new-type bolted joints. *Advanced Steel Construction*. 2021, V. 17, pp. 1–9. Doi:10.18057/IJASC.2021.17.1.1
20. Choi K.-S., Kim H.-J. An Analytical Study on Rotational Capacity of Beam-Column Joints in Unit Modular Frames. *International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*. 2015, V. 9, pp. 83–86. Doi.org/10.5281/zenodo.1098106
21. Ma R., Xia J., Chang H., Xu B., Zhang L. Experimental and numerical investigation of mechanical properties on novel modular connections with superimposed beams. *Engineering Structures*. 2021, V. 232, 111858. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111858
22. Wang Y., Xia J., Ma R., Xu B., Wang T. Experimental study on the flexural behavior of an innovative modular steel building connection with installed bolts in the columns. *Applied Science*. 2019, V. 9, 3468. Doi:10.3390/app9173468
23. Deng E.-F., Zong L., Ding Y., Dai X.-M., Lou., Chen Y. Monotonic and cyclic response of bolted connections with welded cover plate for modular steel construction. *Engineering Structures*. 2018, V. 167, pp. 407–419. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.028
24. Lee S., Park J., Kwak E., Shon S., Kang C., Choi H. Verification of the seismic performance of a rigidly connected modular system depending on the shape and size of the ceiling bracket. *Materials*. 2017, V. 10 (3), p. 263. Doi.org/10.3390/ma10030263

25. Lee S., Park J., Shon S., Kang C. Seismic performance evaluation of the ceiling-bracket-type modular joint with various bracket parameters. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018, V. 150, pp. 298–325. Doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.008
26. Широков В.С., Холопов И.С., Соловьев А.В. Расчет модульного здания, собираемого из блок-боксов. В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. Сборник статей. под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, В.П. Попова; Самарский государственный архитектурно-строительный университет. Самара, 2015. С. 84–89.

References

1. Bad'in G.M., Sychev S.A. Analysis an error of the installation and operation of prefabricated structures. *Modern problems of science and education*. 2015, V. 2–1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21019> (date: 01.08.2022)
2. Iskhodzhanova G.R. Prospects for the use of block-modular structures of buildings for high altitude conditions. *Vestnik KRSU*. 2013, V.7, pp. 151–155. [In Russian]
3. Muksinov R.M., Semenov V.S., Akbaraliev R.Sh. Seismic-safe, prefabricated and mobile buildings for the life support of the population in emergency situations. *Vestnik KRSU*. 2012, V. 7, pp. 110–114. [In Russian]
4. Timoshchenko A.A., Kuprava L.R., Moskalev M.B., Charnik D.G. Features of the construction of modular buildings in high latitudes. *Vestnik studencheskogo nauchnogo obshchestva*. 2018, V. 2, pp. 154–156. [In Russian]
5. Vashpanov K.S. Seismic resistance of modular buildings. *Cherepovets State University Bulletin*. 2012, V. 4, pp. 7–11. [In Russian]
6. Granovsky A. V., Smirnov V. A., Fedorov M. V. et al. To the assessment of seismic resistance of buildings made using the volume-modular technology of the company “KNAUF”. *Industrial and Civil Engineering*. 2020, V. 2, pp. 34–39. Doi: 10.33622/0869-7019.2020.02.34-39 [In Russian]
7. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Experimental evaluation of the seismic performance of modular steel-braced frames. *Engineering Structures*. 2009, V. 31, pp. 1435–1446. Doi:10.1016/j.engstruct.2009.02.024
8. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2009, V. 13, pp. 1–21. Doi: 10.1080/13632460802212576
9. Annan C.D., Youssef M.A., El-Naggar M.H. Seismic vulnerability assessment of modular steel buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2009, V. 13, pp. 1065–1088. Doi: 10.1080/13632460902933881
10. Shi F., Wang H., Zong L., Ding Y., Su J. Seismic behavior of high-rise modular steel constructions with various module layouts. *Journal of Building Engineering*. 2020, V. 31, 101396. Doi.org/10.1016/j.job.2020.101396
11. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load. *Engineering Structures*. 2020, V. 213, pp. 110628. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110628
12. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Numerical study of the structural response to wind loading: modular building case study. 13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures 31 January – 2 February 2018, Perth, Australia. 2018, 1025
13. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural Response of Modular Buildings – An Overview. *Journal of Building Engineering*. 2018, V. 23, pp. 45–56. Doi.org/10.1016/j.job.2017.12.008

14. Alembagheri M., Sharafi P., Rashidi M., Bigdeli A., Farajian M. Natural dynamic characteristics of volumetric steel modules with gypsum sheathed LSF walls: Experimental study. *Structures*. 2021, V. 33, pp. 272–282. Doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.068
15. Широков В.С., Гордеева Т.Е., Боcharov А.Ю. Analytic method of structural analysis of modular buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, V. 775, 012148. Doi:10.1088/1757-899X/775/1/012148 [In Russian]
16. Широков В.С., Kholopov I.S., Solovjev A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building. *Procedia Engineering*. 2016, V. 153, pp. 655–661. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.218 [In Russian]
17. Широков В., Soloviev A., Гордеева Т. Determining internal forces in modular building elements under action wind load. *MATEC Web of Conferences*. 2018, V. 196, 02010. Doi.org/10.1051/mateconf/201819602010 [In Russian]
18. Cho B.-H., Lee J.-S., Kim H., Kim D.-J. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading. *Applied Sciences*. 2019, V. 9, 1929. Doi.org/10.3390/app9091929
19. Khan K., Yan J.-B. Numerical studies on the seismic behaviour of a prefabricated multi-storey modular steel building with new-type bolted joints. *Advanced Steel Construction*. 2021, V. 17, pp. 1–9. Doi:10.18057/IJASC.2021.17.1.1
20. Choi K.-S., Kim H.-J. An Analytical Study on Rotational Capacity of Beam-Column Joints in Unit Modular Frames. *International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*. 2015, V. 9, pp. 83–86. Doi.org/10.5281/zenodo.1098106
21. Ma R., Xia J., Chang H., Xu B., Zhang L. Experimental and numerical investigation of mechanical properties on novel modular connections with superimposed beams. *Engineering Structures*. 2021, V. 232, 111858. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111858
22. Wang Y., Xia J., Ma R., Xu B., Wang T. Experimental study on the flexural behavior of an innovative modular steel building connection with installed bolts in the columns. *Applied Science*. 2019, V. 9, 3468. Doi:10.3390/app9173468
23. Deng E.-F., Zong L., Ding Y., Dai X.-M., Lou., Chen Y. Monotonic and cyclic response of bolted connections with welded cover plate for modular steel construction. *Engineering Structures*. 2018, V. 167, pp. 407–419. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.028
24. Lee S., Park J., Kwak E., Shon S., Kang C., Choi H. Verification of the seismic performance of a rigidly connected modular system depending on the shape and size of the ceiling bracket. *Materials*. 2017, V. 10 (3), 263. Doi.org/10.3390/ma10030263
25. Lee S., Park J., Shon S., Kang C. Seismic performance evaluation of the ceiling-bracket-type modular joint with various bracket parameters. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018, V. 150, P. 298–325. Doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.008
26. Широков В.С., Kholopov I.S., Solovev A.V. Design of a modular building assembled from block boxes. Traditions and innovations in construction and architecture. *Construction. Digest of articles*. Samara, 2015, pp. 84–89. [In Russian]

Данные об авторе / Information about author

Широков Вячеслав Сергеевич

Соискатель АО «НИЦ «Строительство»

адрес: 443110, г. Самара, ул. Ново-Садовая, д. 30, кв. 425

e-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com

тел.: +7-927-659-55-19

Viacheslav S. Shirokov

External PhD student of JSC RCC

address: Novo-Sadovaya str., 30-425, Samara 443110, Russian Federation

e-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com

tel.: +7-927-659-55-19

УДК 698.3

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-34-46](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-34-46)

Теоретические и экспериментальные исследования

К вопросу определения причин трещинообразования в тонких крупноформатных облицовочных плитах

Павлова М.О.¹, Захаров В.А.², Кошелева Л.И.³

^{1,2} АО «НИЦ «Строительство» ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.
Москва, Российская Федерация

³ АО «НИЦ «Строительство» НИИЖБ им. А.А. Гвоздева.
Москва, Российская Федерация

Аннотация: В статье приведены результаты лабораторных исследований конструкции облицовки из крупноформатных фиброцементных плит в составе навесной фасадной системы и анализ проектных решений смонтированных на объекте конструкций.

Технические решения, примененные на фасадах жилого комплекса переменной этажности, отличаются сложностью исполнения и индивидуальными архитектурными решениями, архитектурная выразительность достигается за счет применения на фасадах крупноформатных плит облицовки из фиброцемента различных цветовых оттенков (белого, черного, красного, всего до 7 видов оттенков). Применение крупноформатных облицовочных плит различной конфигурации на фасадах зданий следует относить к объектам экспериментального строительства. Разработка проекта по устройству фасадов здания выполняется на основе типовых технических решений без учета индивидуальных особенностей узлов и без учета влияния солнечной радиации и повышенных/пониженных температур при работе конструкции. Основной проблемой, затрагиваемой в статье, являются проблемы проектирования, монтажа и эксплуатации зданий, в том числе в сейсмических районах, а также высотой более 100 м с облицовкой крупноформатными элементами из фиброцемента различной цветовой гаммы, закрепленных на металлических подконструкциях навесных фасадных систем в условиях мегаполисов.

Ключевые слова: навесная фасадная система, крупноформатные фиброцементные плиты, обследование технического состояния облицовки здания, проектирование навесных фасадных систем, ошибки монтажа, технические решения, коэффициент термического расширения, экспериментальные исследования, методы испытаний

Для цитирования: Павлова М.О., Захаров В.А., Кошелева Л.И. К вопросу определения причин трещинообразования в тонких крупноформатных облицовочных плитах // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 4. С.34-46.

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-34-46](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-34-46)

Theoretical and experimental studies

Problems of the joint application of metal substructures of suspended facade systems and large-size fiber cement elements on the facades of modern development buildings

@ М.О. Павлова, В.А. Захаров, Л.И. Кошелева, 2022

Pavlova M.O.¹, Zakharov V.A.², Kosheleva L.I.³

^{1,2} JSC “Research Center “Construction” Central Research Institute of Building Constructions named after V.A. Kucherenko (TSNIISK)

³ JSC “Research Center “Construction” Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (NIIZHB)

Abstract: The article presents the results of laboratory studies of the construction of cladding made of large-format fiber cement slabs as part of a hinged facade system and an analysis of design solutions of structures mounted on the object. The technical solutions applied on the facades of the residential complex of variable number of storeys differ in the complexity of execution and individual architectural solutions, architectural expressiveness is achieved through the use of large-format fiber cement cladding plates of various color shades (white, black, red shades up to 7 types) on the facades. The use of large-format facing plates of various configurations on the facades of buildings should be attributed to the objects of experimental construction. The development of a project for the construction of building facades is carried out on the basis of standard technical solutions without taking into account the individual characteristics of the nodes and without taking into account the influence of solar radiation and elevated / lowered temperatures during the operation of the structure. The main problem addressed in the article is the problems of design, installation and operation of buildings, including in seismic areas, as well as with a height of more than 100 m with facing with large-format elements of fiber cement of various colors, fixed on metal substructures of hinged facade systems in megacities.

Keywords: hinged facade system, large-format fiber cement slabs, inspection of the technical condition of the building cladding, design of hinged facade systems, installation errors, technical solutions, coefficient of thermal expansion, experimental studies, test methods

For citation: Pavlova M.O., Zakharov V.A., Kosheleva L.I. Problems of the joint application of metal substructures of suspended facade systems and large-size fiber cement elements on the facades of modern development buildings. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 4, pp. 34-46 DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-34-46](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-34-46)

Введение

Современный архитектурный облик городской застройки характеризуется сочетанием стекла, бетона, кирпича, керамогранита и композитных материалов в декоративной отделке фасадов зданий.

Тенденции последних лет – строительство жилых и административных комплексов переменной этажности, высотой 50 –150 м, при этом часто жилые комплексы возводятся в едином стиле, на единых стилобатах, отличаясь уникальным архитектурным стилем и разнообразием цветовых решений. Перед конструктором возникает задача воплотить замыслы архитектурного бюро, выполнить конструкции облицовки в желаемых материалах и цветовых гаммах, при этом не допустить ошибок при проектировании.

Сложность заключается в том, что в распоряжении проектировщиков находятся типовые альбомы технических решений, которые проработаны специалистами разработчика системы крепления при ее создании. Нюанс работы заключается в подборе из имеющейся номенклатуры необходимых элементов, входящих в унифицированный перечень выбранной навесной фасадной системы. Информации в обосновывающей документации производителя достаточно для понимания конструкции, есть возможность ознакомиться с элементами выпускаемой продукции и комплектом изделий, из которых при проектировании потребуется сконструировать облицовку зданий. Иными словами,

пользуясь типовыми альбомами можно качественно выполнить проект фасада для зданий в плане прямоугольной или Г-образной конфигурации.

Базовые технические решения, которые имеются в наличии у разработчиков фасадных конструкции прошли исследования, получили положительные результаты, обоснованные расчетом и подтверждены испытаниями по механической, в том числе для сейсмоопасных районов и пожарной безопасности, апробированы на объектах и обеспечены разрешительной и обосновывающей документацией.

Отсутствие исследований и понимания характера работы новых в техническом плане конструкций облицовки после внесения в типовые конструкции дополнений и изменений, которые строители реализуют непосредственно на объектах, может привести к серьезным авариям на строительной площадке. Примером могут служить многочисленные обращения в адрес ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко заказчиков уже после сдачи объектов в эксплуатацию.

Сложность при проектировании возникает при оценке работы конструкции в связи с увеличением размеров облицовочных панелей или с необходимостью замены материалов на аналоги, физико-механические характеристики которых могут отличаться от исходных.

Предметом отдельных исследований является влияние на работу конструкции изменения габаритов облицовки, например, увеличении размеров панелей, соотношения сторон или уменьшении толщины элемента. Проведенные работы подтвердили существенное влияние геометрии изделий на трещинообразование в облицовочном слое и необходимость внесения корректировок в применяемые типовые конструктивные решения.

Основная часть

Как показали исследования, проведенные специалистами лаборатории надежности фасадов и теплоизоляционных фасадных систем ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, применение на фасадах облицовочных изделий различных цветовых гамм по единым правилам, без учета особенности совместного влияния температуры окружающего воздуха и солнечной радиации также может приводить к возникновению повреждений в конструкциях с облицовкой из тонких крупноформатных плит из фиброцемента (рис. 1). Фиброцементные плиты - это облицовочные изделия, материал которых состоит из 85-90% цемента и 10-15% минеральных добавок и фибры — целлюлозных или синтетических волокон, как армирующего компонента, придающего прочность на изгиб. Также в состав фиброцементных плит входят гидрофобизаторы – добавки, одновременно защищающие материал от впитывания влаги и позволяющие ему «дышать». Снаружи плиты имеют атмосферостойкое покрытие.

В качестве примера могут быть приведены работы по обследованию наружной облицовки комплекса зданий, возведенного в 2020 году. Жилой комплекс представляет собой группу из 10 сгруппированных попарно высотных жилых зданий, объединенных в единый архитектурный объем. Максимальная отметка здания составляет +129,0 м (отметка верха парапета здания), высота типового этажа – 3.150 м.

Конструктивная схема зданий комплекса каркасная, несущие конструкции выполнены из монолитного железобетона. Наружные ограждающие стеновые конструкции выполнены с применением навесных фасадных систем и облицовочных изделий различных размеров (рис. 1).



Рисунок 1 – Общий вид объекта обследования с облицовкой фасадов из тонких крупноформатных фиброцементных плит

Figure 1 – General view of the examination object with fibro-cement slabs

При устройстве фасадов зданий применены крупноформатные фиброцементные плиты с максимальными габаритами до 2130 x 1315 (Н). Применяемые плиты толщиной 8 мм различных оттенков белого, серого, оранжевого, красного и черного цветов. Крепление плит выполнено с применением вертикальных направляющих из профилей Г- и С-образного поперечного сечения с размером 40 x 40 x 1,2 мм. Схема крепления плит предусматривает установку до 4 (четырех) направляющих по длине плит в случае ее горизонтального расположения. Закрепление облицовки выполнялось заклепками через пластиковую гильзу, в соответствии со схемой, которая была разработана производителями облицовки для плит, выполненных из базового (белого) цвета.

В соответствии с документацией на фиброцементные плиты, центральное крепление плит – неподвижное, далее закрепление облицовочной плиты выполняется по часовой стрелке с возможностью перемещения при деформациях материала относительно неподвижной точки крепления. При этом диаметр отверстия в плитах в подвижных точках крепления должен превышать диаметр втулки для обеспечения компенсации температурных деформаций изделий.

При осмотре фасадных конструкций в летний период при нагревании поверхности на фасадах здания были выявлены повреждения плит преимущественно темных цветов (рис 2).

На участках повреждений можно было наблюдать типовые дефекты (рис. 2): сколы фрагментов облицовочных панелей, коробление облицовочных плит черного и темных цветов с визуально определяемым выпучиванием в сторону улицы, горизонтальные и вертикальные трещины, проходящие через элементы крепления плит облицовки, наклонные трещины, проходящие через верхние и боковые элементы крепления.

Причинами повреждений являются ошибки проектирования и нарушения при проведении строительно-монтажных работ в процессе монтажа конструкций с облицовкой из крупноформатных плит из фиброцемента. Исследования работы облицовочного слоя из плит больших размеров в составе навесной фасадной системы не производились, проектирование осуществлялось на основе типовых решений для мелкоформатных плит. Научно-техническое сопровождение проектирования и строительства также не осуществлялось. В результате, не были учтены особенности новой фасадной конструкции, неверно выполнена расстановка деформационных швов в подконструкциях и облицовке, применены элементы подконструкции, схемы и узлы крепления, которые не пригодны для

объекта. Размеры облицовки превышают разрешенные, безопасная эксплуатация которых подтверждена экспериментально.

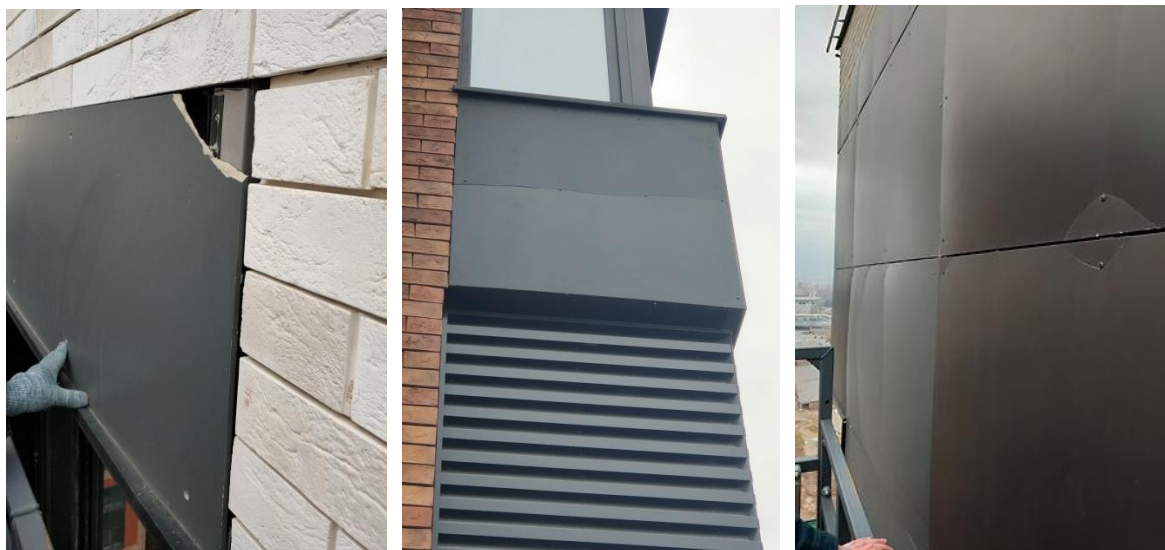


Рисунок 2 – Дефекты крупноформатной облицовки из фиброцемента

Figure 2 – Defects of large-format fiber cement cladding

Основное влияние на процесс деформирования и образования трещин в облицовке оказал цвет изделия.

Наибольшее количество дефектов в виде трещин выявлено на фиброцементных плитах оттенков темных и ярких цветов (черного, серого и красного). Повреждений плит светлых тонов практически не обнаружено. В процентном соотношении количество поврежденных черных плит от общего числа повреждений составляло, ориентировочно, 70%, красных тонов – 20%, серых тонов – 10%. Повреждение плит светлых тонов составляло менее 1% .

Проведенные лабораторные исследования по определению физико-механических показателей облицовочных плит из фиброцемента подтвердили предположения, которые были сформулированы по результатам анализа проекта, на основании документации на применяемые материалы и визуального осмотра возведенных конструкций.

По результатам испытаний образцов фиброцементных плит, проведенных в лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева определены показатели плотности, водопоглощения, прочности при изгибе, пористости и морозостойкости.

Подготовленные к испытаниям образцы имели следующие геометрические и цветовые характеристики:

- 50 мм × 50 мм × 8 мм – 7 шт. (белые);
- 70 мм × 70мм × 8 мм – 9 шт. (белые);
- 70 мм × 70мм × 8 мм – 12 шт. (черные);
- 100 мм × 220 мм × 8 мм – 18 шт. (черные).

До испытания образцы хранились в лабораторных условиях при температуре 20 °С и относительной влажности 70%.

Плотность, водопоглощение, предел прочности при изгибе, морозостойкость представленных образцов определялись стандартными методами в соответствии с [10]. За плотность принималось среднеарифметическое значение результатов испытаний семи образцов. Результаты испытаний по определению предела прочности при изгибе по среднеарифметическому значению – из шести образцов.

По результатам проведенных лабораторных испытаний получены следующие результаты:

- плотность материала образцов (всех цветов) – 2180 кг/м³;
- водопоглощение белых образцов – 8,8%, черных – 12,3%;
- прочность при изгибе – 22,9 МПа;
- морозостойкость – F150.

Характеристики, полученные по результатам испытаний, в целом, соответствовали заявленным производителем в паспортных данных на изделия. Однако, данные, приведенные в паспортах на партии, не дифференцированы по цветовому решению облицовочных плит из фиброцемента.

Учитывая специфику объекта, было принято решение о проведении лабораторных испытаний по определению коэффициента теплового линейного расширения фиброцементных плит разных цветов. С целью определения исходных данных для последующих вычислений величины требуемого параметра проводились замеры температуры нагрева экспериментальных образцов фиброцементных плит в лабораторных условиях.

Лабораторные испытания проводились на образцах (фрагментах), выпиленных из цельных фиброцементных плит, следующих размеров:

- 8 мм × 40 мм × 160 мм – 6 шт. (белые);
- 8 мм × 40 мм × 160 мм – 6 шт. (красные);
- 8 мм × 40 мм × 160 мм – 6 шт. (черные).

В ходе проведения лабораторных исследований все образцы нагревались до 90–95°С в сушильном шкафу. Далее нагретые образцы фиксировались на лабораторном штативе. Один конец образцов опирался на горизонтальную плиту штатива, на другой конец образцов устанавливался индикатор часового типа и определялось изменение размеров образцов по длине, ширине и толщине (рис. 3–4).



Рисунок 3 – Общий вид образцов фиброцементных плит красного цвета до испытаний с лицевой поверхности

Figure 3 – General view of samples of fiber cement slabs of red color before testing from the front surface



Рисунок 4 – Общий вид образцов в процессе определения коэффициента теплового линейного расширения по длине

Figure 4 – General view of samples in the process of determining the coefficient of thermal linear expansion along the length

По результатам лабораторных испытаний вследствие температурного воздействия на фрагменты фиброцементных плит сделан основной вывод о том, что коэффициент теплового линейного расширения испытанных образцов по толщине превышает коэффициент теплового линейного расширения испытанных образцов по длинной стороне в 1,5–1,8 раза. Такой разброс значений коэффициента теплового линейного расширения плит может инициировать их коробление и растрескивание. Максимальный коэффициент теплового расширения образцов по толщине составил $19,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что превышало указанные в технической документации данные производителя плит в 2 (два) раза.

Кроме того, проводились испытания по определению температуры нагрева поверхности изделий из фиброцементных плит в зависимости от цветовой гаммы при совместном воздействии температуры окружающего воздуха, влажности и солнечной радиации в естественных условиях окружающей среды. Было произведено порядка 150 измерений.

Опыты выполнялись в течение июля-августа 2022 года, при средних дневных температурах наружного воздуха $+30 \text{ }^\circ\text{C}$. По данным портала Погода в Москве максимальное среднесуточное количество солнечных часов в июле составляет 10.3 часов - усредненное количество часов за день, в течение которых прямые солнечные лучи достигают поверхности земли. Определение температуры поверхности выполнялось с 10 часов утра до 18 часов вечера с постоянным временным интервалом.

В процессе обработки замеров установлено, что незащищенный от солнечных лучей термометр нагревался до $+48 \text{ }^\circ\text{C}$, а термометр, защищенный от солнечных лучей черной ветошью, нагревался на 7 градусов выше – до $+55 \text{ }^\circ\text{C}$.

Температура нагрева поверхности фиброцементных плит определялась на образцах (фрагментах) из цельных плит, используемых на объекте строительства.

Для проведения испытаний заказчиком были представлены следующие два вида образцов:

- образец №1, RAL 9011 (черный) размером 597 мм x 1002 мм x 8 мм;
- образец №2, RAL 8004 (красный) размером 430 мм x 1002 мм x 8 мм.

Специалистами с помощью термогигрометра измерялась температура нагрева поверхности фиброцементных плит в трех точках по длине образцов (рис. 5). В течение

дня температура и влажность окружающего воздуха замерялись при помощи инфракрасного термометра.



Рисунок 5 – Общий вид образцов во время определения температуры нагрева поверхности плит

Figure 5 – General view of samples during tests to determine the heating temperature of the surface of the plates

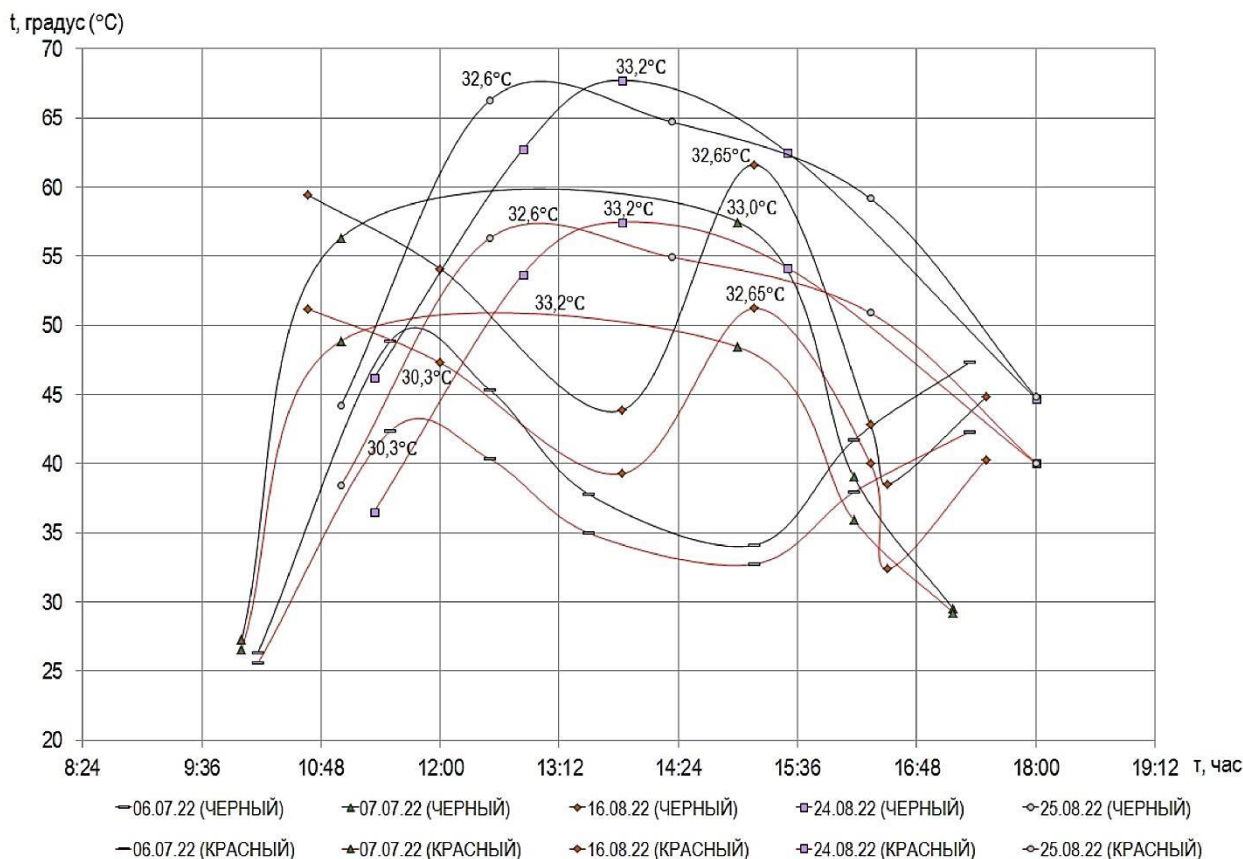
Характерные результаты определения температуры нагрева поверхности образцов из фиброцементных плит двух цветов приведены в таблице №1.

Таблица №1

№ п/п	Дата	Номер и цвет образца	Время	Температура воздуха, °С	Влажность воздуха, %	Температура поверхности, °С	Погодные условия
1	2	3	4	5	6	7	8
1	06. 07. 2022	Обр. 1 RAL 9011 (черный)	11:30	30.30	49.90	48.87	Солнечно
2		Обр.2 RAL 8004 (красный)	11:30			42.37	Солнечно
3		Обр. 1 RAL 9011 (черный)	13:30	29.80	44.65	37.77	Облачно
4		Обр.2 RAL 8004 (красный)	13:30			34.97	Облачно
5	07. 07. 2022	Обр. 1 RAL 9011 (черный)	15:00	33.00	38.45	57.47	Солнечно
6		Обр.2 RAL 8004 (красный)	15:00			48.43	Солнечно

№ п/п	Дата	Номер и цвет образца	Время	Температура воздуха, °С	Влажность воздуха, %	Температура поверхности, °С	Погодные условия
1	2	3	4	5	6	7	8
7		Обр. 1 RAL 9011 (черный)	16:10	31.60	38.10	39.03	Облачно
8		Обр.2 RAL 8004 (красный)	16:10			35.90	Облачно
9	16.07.2022	Обр. 1 RAL 9011 (черный)	15:10	32.65	28.95	61.63	Солнечно
10		Обр.2 RAL 8004 (красный)	15:10			51.23	Солнечно
11		Обр. 1 RAL 9011 (черный)	16:20	31.45	29.45	42.83	Облачно
12		Обр.2 RAL 8004 (красный)	16:20			40.03	Облачно
13	24.08.2022	Обр. 1 RAL 9011 (черный)	12:50	33,20	21,20	62,73	Солнечно
14		Обр.2 RAL 8004 (красный)	12:50			53,70	Солнечно
15		Обр. 1 RAL 9011 (черный)	13:50	33,40	21,60	67,73	Солнечно
16		Обр.2 RAL 8004 (красный)	13:50			57,47	Солнечно
17	25.08.2022	Обр. 1 RAL 9011 (черный)	11:00	30,60	30,10	44,17	Солнечно
18		Обр.2 RAL 8004 (красный)	11:00			38,40	Солнечно
19		Обр. 1 RAL 9011 (черный)	12:30	32,60	23,30	66,27	Солнечно
20		Обр.2 RAL 8004 (красный)	12:30			56,30	Солнечно
21		Обр. 1 RAL 9011 (черный)	14:20	33,00	23,80	64,70	Солнечно
22		Обр.2 RAL 8004 (красный)	14:20			54,93	Солнечно

По полученным значениям температуры нагрева поверхности фиброцементных плит разных цветов в зависимости от изменяющейся в течение дня температуры воздуха построены графические зависимости (рис. 6).



* Примечание: на графиках изменения температуры поверхности отмечены максимальные значения температура наружного воздуха в течении дня

Рисунок 6 – График изменения температуры нагрева поверхности фиброцементных плит черного и красного цветов в зависимости от температуры окружающего воздуха в течение светового дня.

Figure 6 – Graph of changes in the heating temperature of the surface of fiber cement slabs depending on the ambient temperature during daylight hours.

При определенных погодных условиях графические зависимости в виде линий, соединяющих значения температур в точках замеров имеют характерные формы. Анализ результатов замеров позволяет отметить, что при облачной погоде, при отсутствии прямого воздействия солнечных лучей на поверхность образцов температура поверхности фиброцементных плит соответствует температуре окружающего воздуха или превышает ее не более чем на 30 %. В жаркую солнечную погоду температура поверхности экспериментальных образцов превышает температуру окружающего воздуха в два раза – на 100 %. Так, по результатам замеров, температура поверхности черного образца №1 при интенсивном воздействии солнечных лучей достигла величины 67 °С (при температуре окружающего воздуха 33,4 °С). При этом относительная влажность воздуха не оказывает существенного влияния на приведенные величины температур поверхности. Следует отметить, что, исходя из экспериментальных данных, поверхность плит темного цвета нагревается на 15-20% сильнее, чем поверхность плит красного оттенка.

В жаркую летнюю погоду температура поверхности облицовочных изделий черного цвета значительно повышается за счет большего поглощения теплоты прямой солнечной радиации. При переменной облачности (рассеянной солнечной радиации) происходит снижение температуры поверхности образцов вплоть до величины соответствующей температуре окружающего воздуха. Температура поверхности образцов соответствовала температуре окружающего воздуха при перемещении образцов в

закрытое помещение со стационарным температурным режимом (на графике – крайние левые точки замеров температуры поверхности образцов в крытом производственном помещении при температуре окружающего воздуха 25 °С).

Температура поверхности испытуемых образцов зависит от вида солнечной радиации, воздействующей на поверхность плит из фиброцемента: черные плиты активнее поглощают солнечные лучи и сильнее нагреваются, чем красные плиты.

На основе проведенных замеров необходимо сделать вывод о том, что при проектировании металлической подконструкции и назначении величины компенсационных зазоров в узлах креплений должен учитываться не только масштабный фактор (длина, ширина и толщина облицовочных плит при постоянном коэффициенте теплового расширения, установленного производителем плит), но и интенсивность воздействия солнечной радиации на облицовочные плиты различных цветов. При проектировании фасадных конструкций с применением тонких крупноформатных облицовочных изделий следует учитывать приращение температуры облицовочных плит за счет поглощения теплоты солнечной радиации, при этом учитывать, что цвет поверхности, тип покрытия при одном и том же базовом материале оказывают определяющее влияние на увеличение температуры при эксплуатации. Кроме того, следует учитывать влияние теплового излучения от расположенных в непосредственной близости элементов покрытия парапетов, откосов оконных проемов и т.п. элементов декора, температура нагрева которых может быть значительно выше, чем облицовочного слоя.

Указанное в настоящее время не учитывается в практике проектирования и строительства. Производители плит, как правило, определяют параметры и физико-механические характеристики базового материала, без учета геометрических размеров изделий, не владеют данными о влиянии рассмотренных в настоящей статье факторов на изменение формы своей продукции – облицовочных крупноформатных плит при значительных перепадах температуры поверхности образцов. Подобные оценки влияния нагрева поверхности облицовочных плит из фиброцемента различных размеров должны выполняться в процессе проектирования с учетом принятой цветовой гаммы облицовочных плит, в том числе на основе испытаний. Кроме того, учитывая, что облицовочные плиты закрепляются к металлическому каркасу, проектирование подконструкций должно осуществляться с учетом совместной работы с облицовочным слоем, например, не допускается смещение «неподвижных точек» креплений относительно геометрического центра плит. Плиты должны обладать достаточной жесткостью, чтобы исключать поперечный изгиб при температурных воздействиях. Компенсационные зазоры должны приниматься с учетом технологии ведения монтажа фасада, исключать «закусывание» плит в узлах креплений, например, за счет применения опорной планки вместо типовых точечных креплений.

Заключение:

1. По результатам проведенных работ установлено, что при проектировании и возведении фасадных конструкций не учитывается совместная работа облицовочного слоя фасадов зданий и несущих металлических подконструкций. При отсутствии комплексного подхода эксплуатационная надежность фасадных конструкций не будет обеспечена в связи с отсутствием опыта проектирования и строительства нетиповых фасадных систем.

2. Большая вариативность облицовочных элементов, номенклатура которых в последнее время значительно расширяется, не может быть учтена как разработчиками навесных фасадных систем, так и органами, осуществляющими контроль проектирования, строительства, сертификации, экспертным сообществом. Вопросы механической безопасности рассмотренных в настоящей статье конструкций, тонких крупноформатных облицовочных изделий из фиброцемента в составе комбинированных конструкций

должны рассматриваться в рамках научно-технического сопровождения проектирования и возведения фасадных конструкций, в том числе в сейсмоопасных районах.

3. Особенностью объекта строительства, подлежащей дополнительному анализу при проектировании, в том числе по результатам испытаний, следует считать применение при облицовке здания тонких крупноформатных облицовочных элементов из фиброцемента различных цветовых гамм. Применение крупноформатных облицовочных плит различной конфигурации на фасадах зданий следует относить к объектам экспериментального строительства.

4. Сложившееся мнение о том, что в фасадной конструкции, конструктивно разделенной деформационными швами, исключено возникновение трещин в облицовочных плитах, требует корректировки. Трещинообразование может возникать и в пределах температурных блоков, чему пример рассмотренный объект строительства. Солнечная радиация, воздействующая на крупноформатные облицовочные конструкции, вызывает дополнительный нагрев поверхности изделий, величина которого в зависимости от цвета поверхности изделия, типа лакокрасочного покрытия может достигать величин, приводящих к образованию трещин, короблению и растрескиванию тонких плит из фиброцемента на фасадах при эксплуатации. Естественно, что темные поверхности нагреваются и деформируются сильнее, чем светлые, однако количественный анализ следует осуществлять применительно к объекту строительства. Максимальный габарит для установленных производителем плит параметров изделий следует назначать также по результатам испытаний, в случае выявления при испытаниях изменения формы изделий предпринимать мероприятия по повышению жесткости изделия, совершенствовать металлическую подконструкцию и узлы креплений.

5. При выборе проектных решений, которые сочетают различные цветовые решения и габариты облицовочных элементов, необходимо выполнение комплекса предпроектных работ, направленных на оценку совместной работы применяемых материалов в составе фасадных конструкций, с учетом архитектурных особенностей конкретного объекта, то есть с учетом адаптации типовых технических решений к объекту проектирования с последующим проведением мониторинга возведенных конструкций и технического обслуживания в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

Список нормативных документов

1. ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния»
2. СП 71.13330.2017 «Изоляционные и отделочные покрытия. Актуализированная редакция СНиП 3.04.01-87»
3. СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87»
4. СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений»
5. ГОСТ 18124-2012 «Листы хризотилцементные плоские. Технические условия»
6. ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости»
7. ГОСТ 12730.3-2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения»
8. ГОСТ 12730.4-2020 «Бетоны. Методы определения показателей пористости»
9. ГОСТ 27180-2001 «Плитки керамические. Методы испытаний»
10. ГОСТ 18124-2012 «Листы хризотилцементные плоские. Технические условия»
11. ГОСТ 30340-2012 «Листы хризотилцементные волнистые. Технические условия»
12. СП 97.13330.2016 «Асбестоцементные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 2.03.09-85»

List of regulatory documents

1. GOST 31937-2011 «Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya»
2. SP 71.13330.2017 «Izolyacionnye i otdelochnye pokrytiya. Aktualizirovannaya redakciya SNIP 3.04.01-87»
3. SP 70.13330.2012 «Nesushchie i ograzhdayushchie konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNIP 3.03.01-87»
4. SP 13-102-2003 «Pravila obsledovaniya nesushchikh stroitel'nykh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij»
5. GOST 18124-2012 «Listy khrizotilcementnye ploskie. Tekhnicheskie usloviya»
6. GOST 10060-2012 «Betony. Metody opredeleniya morozostojkosti»
7. GOST 12730.3-2020 «Betony. Metod opredeleniya vodopogloshcheniya»
8. GOST 12730.4-2020 «Betony. Metody opredeleniya pokazatelej poristosti»
9. GOST 27180-2001 «Plitki keramicheskie. Metody ispytanij»
10. GOST 18124-2012 «Listy khrizotilcementnye ploskie. Tekhnicheskie usloviya»
11. GOST 30340-2012 «Listy khrizotilcementnye volnistye. Tekhnicheskie usloviya»
12. SP 97.13330.2016 «Asbestocementnye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNIP 2.03.09-85»

Данные об авторах / Information about authors

Павлова Марина Олеговна – кандидат технических наук, заместитель директора ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» по научной работе, заведующий лабораторией надежности фасадов и теплоизоляционных фасадных систем
1747302@mail.ru, 1747742@mail.ru

Marina O. Pavlova – Ph. D., Deputy Director of the Central Research Institute of Building Constructions named after V.A. Kucherenko (TSNIISK) of JSC “Research Center “Construction”, head of the Laboratory of reliability of thermal insulation of facades and facade systems
1747302@mail.ru, 1747742@mail.ru

Захаров Владимир Андреевич – заместитель заведующего лабораторией надежности фасадов и теплоизоляционных фасадных систем ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»
1747302@mail.ru, 1747742@mail.ru

Vladimir A. Zakharov – deputy head of the Laboratory of reliability of thermal insulation of facades and facade systems of the Central Research Institute of Building Constructions named after V.A. Kucherenko (TSNIISK) of JSC “Research Center “Construction”
1747302@mail.ru, 1747742@mail.ru

Кошелева Лидия Ивановна – начальник отдела новых технологий и мониторинга лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»

Lidiya I. Kosheleva – Head of New Technologies and Monitoring Department Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (NIIZHB) of JSC “Research Center “Construction”

УДК 691

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-47-57](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-47-57)

Теоретические и экспериментальные исследования

**Композиционные материалы в усилении железобетонных конструкций:
виды, свойства, методы производства**

Римшин В.И.^{1,2}, Пакулина Ю.А.²

¹НИИСФ РААСН. Москва, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ». Москва, Российская Федерация

Аннотация: Статья посвящена актуальной проблеме современного строительства – проблеме усиления железобетонных конструкций.

Цель исследования: изучение, анализ, обобщение и систематизация разрозненной научной информации по вопросу усиления железобетонных конструкций композиционными материалами.

Материалы и методы: в статье анализируются характеристики различных композитов, используемых в усилении несущих железобетонных конструкций. В процессе работы были применены такие методы исследования как анализ, классификация и сравнение.

Научная новизна исследования заключается в поиске, обобщении и систематизации разрозненной информации по тематике работы.

Вывод: метод усиления железобетонных конструкций материалами на основе углекомпозитов – наиболее эффективный способ восстановления несущей способности элементов здания.

Ключевые слова: композитная арматура, повреждения, деформации, усиление, безопасность, конструкции, углекомпозиты

Для цитирования: Римшин В.И., Пакулина Ю.А. Композиционные материалы в усилении железобетонных конструкций: виды, свойства, методы производства. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 4. С.47-57

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-47-57](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-47-57)

Theoretical and experimental studies

**Composite materials in reinforcement of reinforced concrete structures: types,
properties, production methods**

V.I. Rimshin^{1,2}, Yu.A. Pakulina²

¹ NIISF RAASN. Moscow, Russian Federation

² Federal state budget educational institution of higher education "National research Moscow state university of civil engineering" (NRU MGSU)
Moscow, Russian Federation

@ В.И. Римшин, Ю.А. Пакулина, 2022

Abstract: The article is devoted to the actual problem of modern construction - the problem of strengthening reinforced concrete structures.

The purpose of the study: study, analysis, generalization and systematization of disparate scientific information on the issue of strengthening reinforced concrete structures with composite materials.

Materials and methods: the article analyzes the characteristics of various composites used in the reinforcement of load-bearing reinforced concrete structures. In the process of work, such research methods as analysis, classification and comparison were applied. The scientific novelty of the study lies in the search, generalization and systematization of disparate information on the subject of the work.

Conclusion: the method of reinforcing reinforced concrete structures with materials based on carbon composites is the most effective way to restore the bearing capacity of building elements.

Keywords: composite reinforcement, damage, deformation, reinforcement, construction

For citation: Rimsin V.I., Pakulina Yu.A. Composite materials in reinforcement of reinforced concrete structures: types, properties, production methods. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 4, pp. 47-57

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-47-57](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-47-57)

Введение

С каждым днём количество зданий и сооружений, которые нуждаются в усилении и ремонте неуклонно увеличивается. Особенно остро данная ситуация ощущается на территории Российской Федерации. Жилой фонд, состоящий из массовой застройки железобетонными многоквартирными домами 70-х – 80-х гг. XX века, к настоящему времени обветшал и требует ремонта. Помимо времени существуют и иные внешние факторы, которые снижают несущую способность железобетонных конструкций. Не всегда возможно усиление железобетонных конструкций традиционными методами, такими как торкретирование, инъектирование и создание внешнего армирования металлом. В таких случаях единственным выходом может быть внешнее армирование легкими и тонкими композитными материалами [1-14]. В зарубежной литературе также освещаются исследования по вопросам усиления конструкций композитными материалами, обеспечивающими необходимую безопасность зданий и сооружений [15-19].

В статье рассматривается место и значение композитных материалов в усилении железобетонных конструкций зданий и сооружений, повышении безопасной эксплуатации зданий и сооружений. Анализируется и описывается сущность применяемых для этой цели композитных материалов, их виды, особенности, возникающие при изменении их состава, а также методы производства.

1. Виды композитов, использующихся для усиления железобетонных конструкций

Как известно, композиционными материалами называются виды материалов, созданные из двух и более видов компонентов. Данные материалы могут быть созданы как искусственно человеком, так и естественно в природе. Важной характеристикой композиционных материалов является то, что химические и/или физические свойства их компонентов отличаются, а их совмещение даёт материал с новыми свойствами. В отличие от смесей и растворов, отдельные компоненты в полимерных материалах остаются таковыми. В макро масштабе материал выглядит однородно, однако, в микро масштабе чётко видна граница раздела компонентов.

В составе композитного материала традиционно выделяют матрицу и наполнитель. Вариативность количества каждого из составляющих композитного материала, их положения друг относительно друга, позволяет получить материал с различными свойствами. Зачастую композиты куда крепче своих традиционных аналогов, но при этом имеют более низкую массу.

В зависимости от матрицы выделяют следующие виды композиционных материалов:

- с металлической матрицей;
- с неметаллической матрицей.

В первом случае, матрица чаще всего выполнена из алюминия, магния, никеля и их сплавов. В зависимости от того, какие материалы добавляются к матрице, композиционные материалы с металлической матрицей принято разделять на следующие виды:

- волокнистые (упрочнение высокопрочными волокнами);
- дисперсно-упрочнённые (упрочнение тугоплавкими частицами, которые не растворяются в основном металле);
- упрочнённые частицами (добавление частиц с низкой стоимостью для заполнения объёма).

Качественным отличием такого рода композитных материалов является длина, на которую передаётся нагрузка. Она меньше, чем у материалов с полимерной матрицей. Также композиты с металлической матрицей могут использоваться при значительно более высоких температурах и более эффективны в малогабаритных, но сильно нагруженных деталях. Свойства данного вида материала позволяют уменьшить массу соединительных узлов (использование резьбовых соединений и т.д.). Особенностью композитов с металлической матрицей является увеличение трещиностойкости объединения матрицы и волокон в сравнении с матрицей, неукреплённой волокнами.

Наиболее часто композиты с металлической матрицей используются в аэрокосмической отрасли, однако, в будущем возможно их применение в гражданском строительстве и в производстве наземного транспорта.

В композиционных материалах с неметаллической матрицей в качестве матрицы используются полимерные, углеродные и керамические материалы. Указанные матрицы упрочняются органическими, стеклянными, углеродными волокнами, также волокнами на основе нитевидных кристаллов (различные оксиды, бориды, нитриты, карбиды) или металлической проволокой.

Армирующие материалы могут быть разных форм: волокна, жгуты, нити, ленты, многослойные материалы.

Углеволоконные композиты используются в производстве более пятидесяти лет. Они применяются в ситуациях, когда их высокая гибкость и низкая масса являются большим преимуществом. История использования полимеров и композитов в строительстве берёт своё начало со времени Второй мировой войны. Впоследствии, в 1960-х годах значительно повысился интерес к технологии производства и использования волоконных полимерных композитов в строительстве.

Основное внимание в статье уделяется тем волоконным композитам, которые в настоящее время используются для проектирования усиления конструкций. То есть, хотя возможны многие различные комбинации материалов (сочетания волокон и матрицы), здесь представлена лишь очень небольшая выборка из почти бесконечного числа возможностей. Для такого рода композитов доступно несколько различных технологий производства, форм компонентов и конечных применений, но в данной статье рассматриваются только те из них, которые наиболее актуальны для проектирования усиления железобетонных конструкций. Более подробное обсуждение волоконных композитов доступно в различных исследованиях по композитным материалам следующих авторов: Г. Икольд (1994), К.Т. Эракович (1998), Л.К. Бэнк (2006) и другие.

2. Виды и характеристики волокон, используемых в композиционных материалах для усиления железобетонных конструкций

Композитные материалы из полимеров, армированных волокном, состоят из трёх основных компонентов: волокон, полимеров и добавок. В волокнистых полимерных композитах волокна с высокой прочностью и высокой жесткостью встроены в низко модульную непрерывную полимерную матрицу и связаны вместе. В случае волоконных композитов, армирующие волокна составляют основу материала и определяют его прочность и жесткость в направлении волокон. Добавки включают пластификаторы, антипирены, пенообразователи, связующие вещества, другие компоненты, также в небольших количествах включают покрытия, пигменты и наполнители. Чтобы использовать весь потенциал композитов в конструкционных приложениях, необходимо понимать свойства и поведение их составляющих, волокон и матриц.

Стекланные волокна являются наиболее часто используемыми армирующими волокнами для композиционных материалов с полимерной матрицей. Расплавленное стекло можно вытягивать в непрерывные нити, которые связываются в жгуты. Покрытие стекланных волокон связующим веществом обеспечивает гибкий слой на границе раздела, улучшает прочность соединения и уменьшает количество пустот в материале. Наиболее распространенные стекланные волокна изготавливаются из У-стекла (отличается низкой электрической проводимостью), S-стекла (отличается высокой прочностью) и щелочестойкого стекла. Е-стекло является наименее дорогим из всех типов стекла и широко используется в армированных стекланным волокном конструкциях. S-стекло имеет более высокий предел растяжения и более высокий модуль упругости, чем Е-стекло.

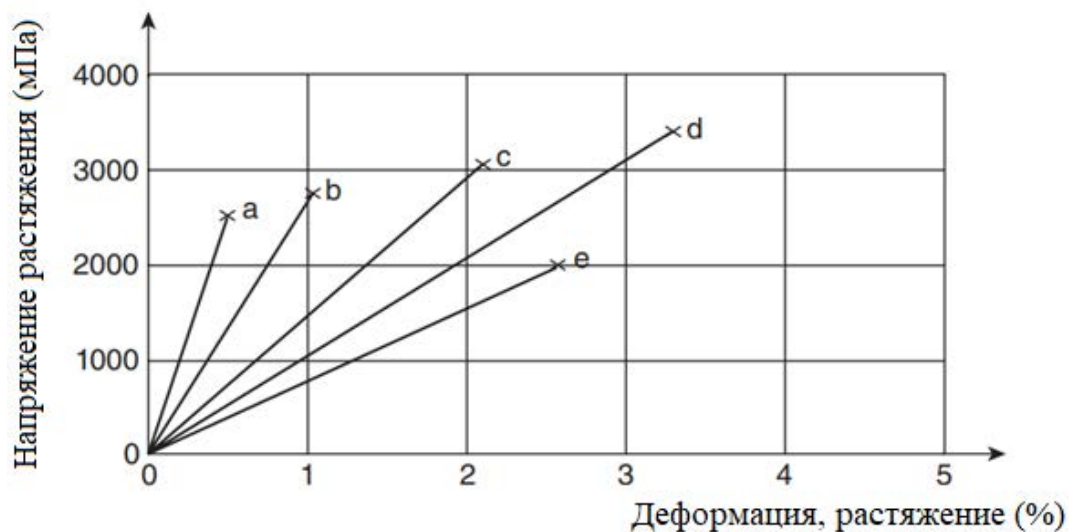


Рисунок 1 – Кривая напряжения-деформации для часто используемых в композитных материалах волокон: а – углеродное (высокий модуль упругости); б – углерод (высокая прочность); в – арамид (Kevlar 49); г – S-стекло; е – E-стекло

Figure 1 – Stress-strain curve for fibers often used in composite materials: a – carbon (high modulus of elasticity); b – carbon (high strength); c – aramid (Kevlar 49); d – S-glass; e – E-glass

Таблица 1 – Свойства различных волокон, используемых в композитных материалах

Table 1 – Properties of various fibers used in composite materials

Тип волокна	Плотность, кг/м ³	Предел прочности на разрыв, мПа	Модуль Юнга (продольной упругости), ГПа	Предельная деформация растяжения, %	Кэф. теплового расширения, 10 ⁻⁶ /°C	Кэф. Пуассона
E-стекло	2500	3450	72,4	2,4	5	0,22
S-стекло	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
Щелочестойкое стекло	2270	1800-3500	70-76	2,0-3,0	-	-
ЕСR-стекло (химически стойкое стекло)	2620	3500	80,5	4,6	6	0,22
Карбон (высокий модуль упругости)	1950	2500-4000	350-650	0,5	-1,2 □ -0,1	0,20
Карбон (высокая прочность)	1750	3500	240	1,1	-0,6 □ -0,2	0,20

Арамид (Kevlar 29)	1440	2760	62	4,4	- 2,0 продольный 59 радиальный	0,35
Арамид (Kevlar 49)	1440	3620	124	2,2	- 2,0 продольный 59 радиальный	0,35
Арамид (Kevlar 149)	1440	3450	175	1,4	- 2,0 продольный 59 радиальный	0,35
Арамид (Technora H)	1390	3000	70	4,4	- 6,0 продольный 59 радиальный	0,35
Арамид (SVM)	1430	3800- 4200	130	3,5	-	-

Полимерные волокна при использовании подходящего метода обработки могут демонстрировать высокие прочность и жесткость. Это происходит в результате выстраивания полимерных цепей вдоль оси волокна. Арамид (сокр. ароматический полиамид) — это общий термин для длинных цепочек синтетических полиамид. Материал имеет самый низкий удельный вес и самое высокое отношение прочности на растяжение к весу среди современных армирующих волокон.

3. Виды и характеристики полимерных матриц, используемых в композиционных материалах для усиления железобетонных конструкций

Матрица в полимерном композите может рассматриваться и как структурный, и как защитный компонент. Смола представляет собой общий термин, используемый для обозначения полимера, материала-предшественника полимера и/или их смеси или состава с различными добавками, химически активными компонентами. Как правило, полимер называют системой смолы во время обработки и матрицей после отверждения полимера. Изготовление и свойства композитного материала в основном зависят от смолы, её химического состава и физических свойств. Материал матрицы обычно составляет от 30% до 60% по объему полимерного композита. Основными функциональными и структурными требованиями к матрице являются:

- связывание армирующих волокон вместе;
- передача и распределение нагрузки на волокна;
- защита волокон от воздействия окружающей среды и механического истирания.

Следовательно, выбор матрицы имеет первостепенное значение при разработке композитной системы и будет влиять как на механические, так и на физические свойства конечного продукта.

Существует два основных класса полимерных матриц, используемых в волокнистых композитах: термореактивные и термопластичные смолы. Термореактивные смолы представляют собой полимеры, которые необратимо преобразуются из низкомолекулярных предшественников с низкой вязкостью. Термопласты — это

полимеры, не образующие поперечных связей. Они есть способность к изменению формы и неоднократному размягчению, и закалке путем воздействия на них температурных циклов, достигающих значений, превышающих температуру их формования.

4. Методики производства композиционных материалов для усиления железобетонных конструкций

Методы производства композитов могут быть как ручным, так и автоматизированным процессом. При этом последние обеспечивают лучший контроль качества, чем первые.

Влажная укладка – это ручной метод, при котором сухая ткань или волокна мата сначала укладываются на основу или форму. Затем наносится смола и равномерно прокатывается по поверхности, чтобы удалить воздушные карманы. Это повторяется до получения необходимого количества слоев.

При структурном восстановлении форма представляет собой просто существующий элемент конструкции, который необходимо укрепить, а стеклопластик остается связанным с формой после отверждения (что обычно происходит при температуре окружающей среды). Этот метод имеет важное преимущество. Он легко и быстро выполняется в полевых условиях, обеспечивая значительные финансовые выгоды по сравнению с традиционными методами структурной реабилитации, такими как внешнее покрытие сталью. Однако в этой процедуре чрезвычайно важен контроль качества, и часто требуется квалифицированная рабочая сила. Мокрая укладка для структурной реабилитации бетонной колонны показана на рис. 2.

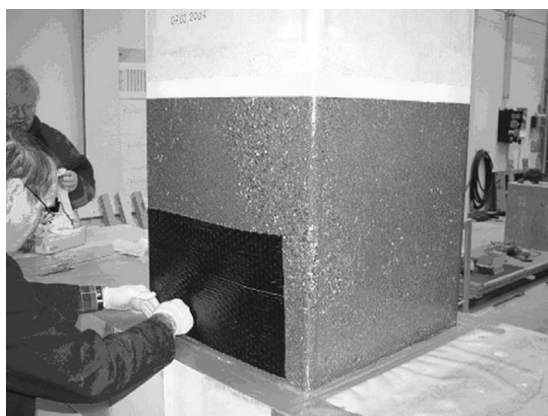


Рисунок 2 – Внешнее армирование колонны с использованием метода влажной укладки композитного материала

Figure 2 – External reinforcement of the column using the method of wet laying of composite material

Пултрузия – это автоматизированный, непрерывный производственный процесс. Возможности конструкции ограничиваются только требованием неизменности профиля по длине объекта. Непрерывные волокна в форме ровинга (некрученая пряжа из нитей) или мата протягивают через ванну со смолой, чтобы покрыть каждое волокно специально

приготовленной смесью смолы, как показано на рис. 3. Волокна с покрытием собираются формовочной направляющей, а затем протягиваются через нагретую головку. Нагрев в головке и катализатор в смеси смолы инициируют отверждение термореактивной смолы. Зоны нагрева и охлаждения в головке контролируют скорость реакции. Полученный высокопрочный профиль нарезается по длине. На выходе из пултрузионной машины, профиль уже готов к использованию.

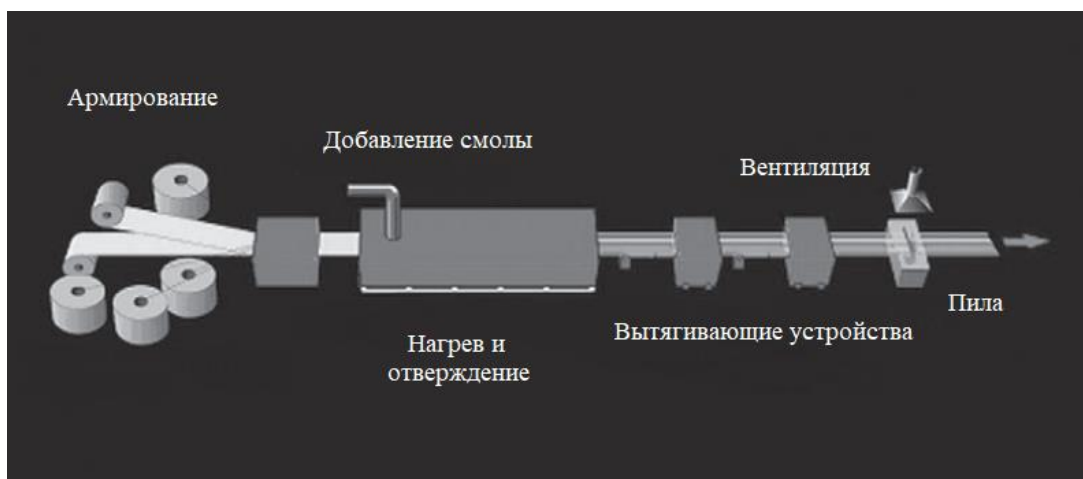


Рисунок 3 – Устройство пултрузионной машины

Figure 3 – Pultrusion machine device

Заключение

Подводя итог вышесказанному, можно утверждать, что усиление внешним армированием композитными материалами – это современный и эффективный способ восстановления несущей способности железобетонных конструкций. Многообразие составов композитов позволяет найти материал под нужды конкретного объекта. Композиционные материалы с полимерной матрицей отличаются лёгкостью, гибкостью и простотой монтажа. Такой метод усиления позволяет добиться восстановления несущей способности той или иной конструкции без изменения габаритов. Монтаж такого рода усиления не требует дорогостоящей и громоздкой техники. Сам процесс монтажа не сопровождается высоким уровнем шума и не доставляет неудобств людям, находящимся в соседних помещениях.

Список литературы

1. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 5. С. 38–42.
2. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. Москва. 2015. 111 с.

3. Римшин В.И. Повреждения и методы расчета усиления железобетонных конструкций. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2001.
4. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Квазилинейные уравнения силового сопротивления и диаграмма $\sigma - \epsilon$ бетона // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2014. № 6. С. 40–44.
5. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Остаточный ресурс силового сопротивления поврежденного железобетона // *Вестник отделения строительных наук РААСН*. 2005. № 9. С. 119 – 126.
6. Бондаренко В.М., Боровских А.В., Марков С.В., Римшин В.И. Элементы теории реконструкции железобетона. Москва. 2002. 190 с.
7. Римшин В.И., Меркулов С.И. О нормировании характеристик стержневой неметаллической композитной арматуры // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 5. С. 22–26.
8. Мосаков Б.С., Курбатов В.Л., Римшин В.И. Основы технологической механики тяжелых бетонов. Минеральные Воды. 2017. 210 с.
9. Римшин В.И., Кустикова Ю.О. Теоретические основы расчета сцепления стеклобазальтопластиковой арматуры с бетоном // *Известия Орловского государственного технического университета*. Серия: Строительство и транспорт. 2009. № 2–22. С. 29–33.
10. Римшин В.И., Бикбов Р.Х., Кустикова Ю.О. Некоторые элементы усиления строительных конструкций композиционными материалами // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2005. № 10. С. 381–383.
11. Варламов А.А., Римшин В.И. Модели поведения бетона. Общая теория деградации. Москва. 2019. Сер.: Научная мысль. 436 с.
12. Обследование и испытание зданий и сооружений. Москва, 2013. Издание четвертое, переработанное и дополненное. 669 с.
13. Курбатов В.Л., Римшин В.И., Шумилова Е.Ю., Дайронас М.В. Технологические процессы в строительстве. Учебное пособие. Москва, 2020. 601 с.
14. Техническая эксплуатация жилых зданий. Москва, 2012. 639 с.
15. Telichenko V., Rimshin V., Eremeev V., Kurbatov V. Mathematical modeling of groundwaters pressure distribution in the underground structures by cylindrical form zone. MATEC Web of Conferences. 2018. 02025
16. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Rimshin V.I. The limiting values of moments and deformations ratio in strength calculations using specified material diagrams. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vladivostok, 2018. 032024
17. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Orlov A., Kurbatov V.L. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with foundation in wooden frame buildings ARPN. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, T. 13, no. 11, pp. 3851–3856
18. Telichenko V.I., Rimshin V.I., Karelskii A.V., Labudin B.V., Kurbatov V.L. Strengthening technology of timber trusses by patch plates with toothed-plate connectors. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017, T. 33, no. 1, pp. 1034–1041
19. Kuzina E., Rimshin V. Deformation monitoring of road transport structures and facilities using engineering and geodetic techniques. International Scientific Conference Energy

Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. *Conference proceedings*. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham, 2018, pp. 410–416.

References

1. Rimshin V.I., Merkulov S.I. Elements of the theory of development of concrete structures with non-metallic composite reinforcement. *Industrial and civil engineering*. 2015, no. 5, pp. 38 – 42 [In Russian]
2. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Dissipative theory of force resistance of iron-concrete Moscow, 2015, 111 p. [In Russian]
3. Rimshin V.I. Damages and methods of calculation of reinforcement of reinforced concrete structures. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Moscow, 2001 [In Russian]
4. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Quasi-linear equations of force resistance and diagram $\sigma - \varepsilon$ of concrete. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. 2014, no. 6, pp. 40 – 44 [In Russian]
5. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Residual resource of force resistance of damaged reinforced concrete. *Bulletin of the Department of Construction Sciences of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2005, no. 9, p. 119 [In Russian]
6. Bondarenko V.M., Borovskikh A.V., Markov S.V., Rimshin V.I. Elements of the theory of reinforced concrete reconstruction Moscow, 2002 [In Russian]
7. Rimshin V.I., Merkulov S.I. On the normalization of the characteristics of rod nonmetallic composite reinforcement. *Industrial and civil construction*. 2016, no. 5, pp. 22–26 [In Russian]
8. Mosakov B.S., Kurbatov V.L., Rimshin V.I. Fundamentals of technological mechanics of heavy concrete. *Mineralnye Vody*, 2017, 210 p. [In Russian]
9. Rimshin V.I., Kustikova Yu.O. Theoretical foundations for calculating the adhesion of glass-basalt-plastic reinforcement with concrete. *Izvestiya Oryol State Technical University*. Series: Construction and Transport. 2009, no. 2–22, pp. 29–33 [In Russian]
10. Rimshin V.I., Bikbov R.H., Kustikova Yu.O. Some elements of reinforcement of building structures with composite materials. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2005, no. 10, pp. 381–383 [In Russian]
11. Varlamov A.A., Rimshin V.I. Models of concrete behavior. General theory of degradation for students of engineering and construction faculties receiving education in the field of preparation 08.03.01 "Construction". Moscow, 2019. Ser. Scientific thought, 436 p. [In Russian]
12. Inspection and testing of buildings and structures. Moscow, 2013, 669 p.
13. Kurbatov V.L., Rimshin V.I., Shumilova E.Yu., Daironas M.V. Technological processes in construction. Textbook. Moscow, 2020, 601 p. [In Russian]
14. Technical operation of residential buildings. Moscow, 2012, .639 p.
15. Telichenko V., Rimshin V., Ereemeev V., Kurbatov V. Mathematical modeling of groundwaters pressure distribution in the underground structures by cylindrical form zone. *MATEC Web of Conferences*. 2018, 02025 [In Russian]
16. Karpenko N.I., Erishev V.A., Rimshin V.I. The limiting values of moments and deformations ratio in strength calculations using specified material diagrams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladivostok, 2018, 032024 [In Russian]
17. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Orlov A., Kurbatov V.L. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with foundation in wooden frame buildings.

ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018, Т. 13, no. 11, 3851-3856 [In English]

18. Telichenko V.I., Rimshin V.I., Karelskii A.V., Labudin B.V., Kurbatov V.L. Strengthening technology of timber trusses by patch plates with toothed-plate connectors. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017, Т. 33, no.1, 1034–1041 [In English]

19. Kuzina E., Rimshin V. Deformation monitoring of road transport structures and facilities using engineering and geodetic techniques. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. *Conference proceedings. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham, 2018, pp. 410–416 [In English]

Данные об авторах / Information about authors

Римшин Владимир Иванович, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИСФ РААСН, зав. лабораторией «Мониторинг жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве» профессор кафедры ЖКК НИУ МГСУ v.rimshin@niisf.ru

Vladimir I. Rimshin, Corresponding Member of RAASN, Dr. Sc. Sci., Professor, Chief Researcher, NIISF RAASN, Professor of the Department of Housing and Communal Services, NRU MGSU v.rimshin@niisf.ru

Пакулина Юлия Алексеевна, магистр НИУ МГСУ pakulinaservice@yandex.ru
Yulia A. Pakulina, master of NRU MGSU pakulinaservice@yandex.ru

УДК 699.8; 699.841; 624.042; 624.042.7

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-58-80](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-58-80)

Theoretical and experimental studies

Strengthening the security of Syrian architectural monuments with the help of seismic isolation technologies in order to reduce the negative impact of earthquakes on the psyche of people

Ziad A. Aldrebi¹

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract: The article provides a definition of an earthquake and the causes of its occurrence, describes the types of seismic waves, which are divided into longitudinal and transverse. Three seismic intensity scales are compared, namely the modified Mercalli seismic scale, the 2017 seismic intensity scale, and the Japanese seismic scale. The following is a review of the negative impacts of earthquakes on the building, damage to various buildings in different countries as a result of an earthquake, the occurrence of such phenomena as landslides, soil liquefaction and rupture of the earth's crust, also as a result of an earthquake. The negative impact of earthquakes on the psyche and behavior of people, which causes panic, fear and seismophobia in humans, is considered. Further, it is proposed to use seismic isolation of buildings to reduce the negative impacts of earthquakes on people and buildings, using the example of the Great Mosque of Aleppo in Syria, which is an architectural monument and is included in the UNESCO World Heritage List. The description of the seismicity of the territory of Syria and the city of Aleppo is given, the High Damping Rubber Bearings (HDRB) proposed for use for seismic isolation of the mosque building are described. Formulas are given for calculating various parameters of such HDRB for their subsequent correct selection, depending on the forces acting on the building structures of the building. At the end, conclusions are drawn.

Keywords: seismicity, earthquake, earthquake resistance, base isolation system, Great Mosque of Aleppo in Syria, damage, panic, architectural monuments, building structures.

For citation: Aldrebi Z.A. Strengthening the security of Syrian architectural monuments with the help of seismic isolation technologies in order to reduce the negative impact of earthquakes on the psyche of people [*Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions Safety*], 2022, no. 4, pp.58-80,

DOI: [10.37153/2618-9283-2022-4-58-80](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-58-80)

@ Альдреби З.А., 2022

Теоретические и экспериментальные исследования

Усиление безопасности памятников архитектуры Сирии с помощью технологий сейсмоизоляции с целью снижения негативного воздействия землетрясений на психику людей

Аldreби З.А.¹

¹ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: В статье дается определение землетрясения и причин его возникновения, описываются типы сейсмических волн, которые делятся на продольные и поперечные. Сравниваются три шкалы сейсмической интенсивности, а именно модифицированная сейсмическая шкала Меркалли, шкала сейсмической интенсивности 2017 года и японская сейсмическая шкала. Приводится обзор негативного воздействия землетрясений на здания, повреждения различных зданий в разных странах в результате землетрясений, возникновения таких явлений, как оползни, разжижение почвы и разрыв земной коры, также в результате землетрясений. Рассмотрено негативное влияние землетрясений на психику и поведение людей, которое вызывает у людей панику, страх и сейсмофобию. Далее предлагается использовать сейсмоизоляцию зданий для уменьшения негативного воздействия землетрясений на людей и здания, используя пример Великой мечети Алеппо в Сирии, которая является памятником архитектуры и включена в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Дано описание сейсмичности территории Сирии и города Алеппо, описаны резинометаллические опоры высокого демпфирования (HDRB), предлагаемые для использования для сейсмоизоляции здания мечети. Приведены формулы для расчета различных параметров таких HDRB для их последующего правильного выбора в зависимости от сил, действующих на строительные конструкции здания.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, сейсмостойкость, система изоляции основания, Великая мечеть Алеппо в Сирии, ущерб, паника, архитектурные памятники, строительные конструкции.

Для цитирования: Aldrebi Z.A. Усиление безопасности памятников архитектуры Сирии с помощью технологий сейсмоизоляции с целью снижения негативного воздействия землетрясений на психику людей // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. №4. С.58-80,

DOI: [10.37153/2618-9283-2022-4-58-80](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-58-80)

Introduction

Panic, fear are a natural and protective reaction of people to danger during cataclysms, natural disasters and earthquakes. An earthquake causes all the above reactions in people and is also the cause of many destructions in buildings and structures and all infrastructure in the area where they occur.

To reduce fear and panic among people, and to save buildings and structures from damage or destruction as a result of earthquakes, it is advisable to perform their seismic isolation as one of the possible and effective ways to reduce seismic impacts on the building structures of buildings and structures, and on people in them, which leads to the preservation of their life and health.

Earthquakes are subterranean shocks and vibrations of the Earth's surface, caused by natural causes, mainly tectonic processes, or artificial processes such as explosions, filling reservoirs, collapse of underground mine workings, etc. [1-6].

Every year on the globe there is over 300 thousand earthquakes, as a result of which dies about 10 thousand people.

The following processes cause seismic phenomena (earthquakes):

- tectonic, occurring in connection with tectonic movements of the earth's crust;
- volcanic (volcanic eruptions);
- denudation associated with karst ramparts, mountain collapses, bomb explosions in the ground, as well as with dynamic influences during production leadership of various works.

Tectonic movements of the earth's crust occur mainly slowly and are hardly noticeable within a person's life. Such slow displacements are called crane displacements. However, over many millions of years, displacements measured in hundreds and thousands of kilometers accumulate.

Volcanic and denudation processes are local in nature, while tectonic processes often cover vast territories.

Earthquake sources are the hypocenter and epicenter. Hypocenters are usually located at a depth of 10–700 km. The place above the focus of an earthquake on the surface of the earth is called the epicenter. Elastic oscillations of the earth's crust propagate in the form of waves from the hypocenter in all directions. These vibrations are of two types: P and S-waves propagating in deep rocks and surface acoustic L- and R-waves (figure 1 - 5).

The velocity of propagation of P-waves (compression waves) is 1.7 times greater than the velocity of S-waves (shear waves), so they are the first to be recorded by seismic stations.

The speed of longitudinal P-waves (compression waves) is equal to the speed of sound in the corresponding rock. If the wave frequencies are greater than 15 Hz, they are perceived by us as an underground rumble and rumble. Secondary transverse seismic waves S-waves (shear waves) cause oscillations of rock particles perpendicular to the direction of wave propagation. The third type of elastic waves is called long or surface seismic waves. It is this third type that causes the most severe destruction [1-2].

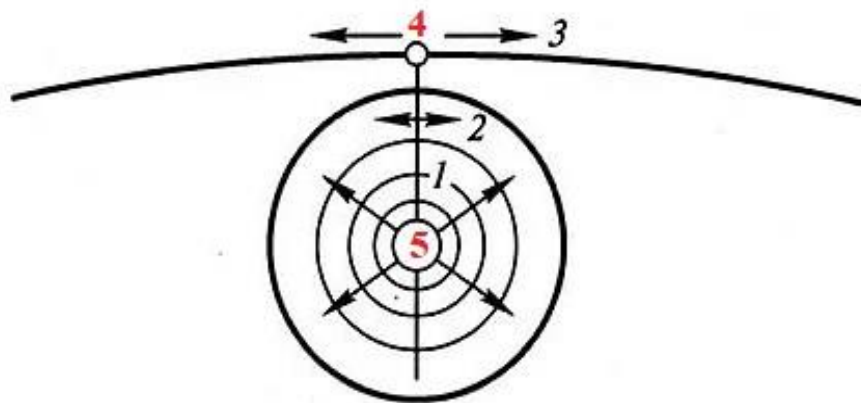


Figure 1 – Scheme of the propagation of seismic waves in the earth's crust and on the surface of the earth: 1–longitudinal seismic waves; 2 – transverse seismic waves; 3 – surface seismic waves; 4 – earthquake epicenter; 5 – earthquake hypocenter.

Рисунок 1 – Схема распространения сейсмических волн в земной коре и на поверхности земли: 1 – продольные сейсмические волны; 2 – поперечные сейсмические волны; 3 – поверхностные сейсмические волны; 4 – эпицентр землетрясения; 5 – гипоцентр землетрясения.

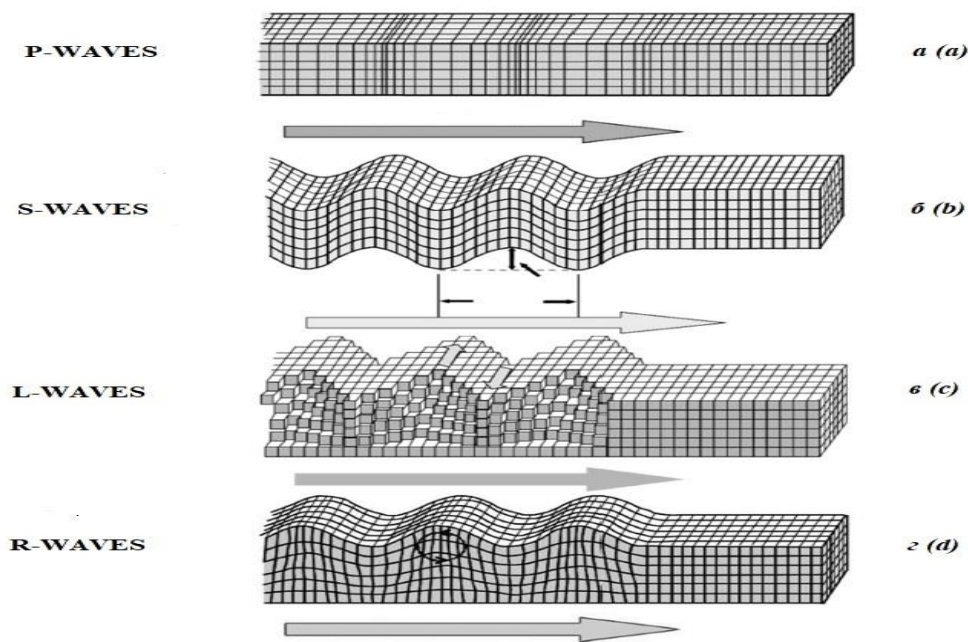


Figure 2 – Body and surface seismic waves:
a – Body Primary (compression) waves; *b* – Body Secondary (shear) waves;
c – Surface Love waves; *d* – Surface Rayleigh waves.

Рисунок 2 – Объемные и поверхностные сейсмические волны:
a – Первичные волны тела (сжатия); *b* – Вторичные волны тела (сдвига);
в – Поверхностные волны Лява; *г* – Поверхностные волны Рэлея.

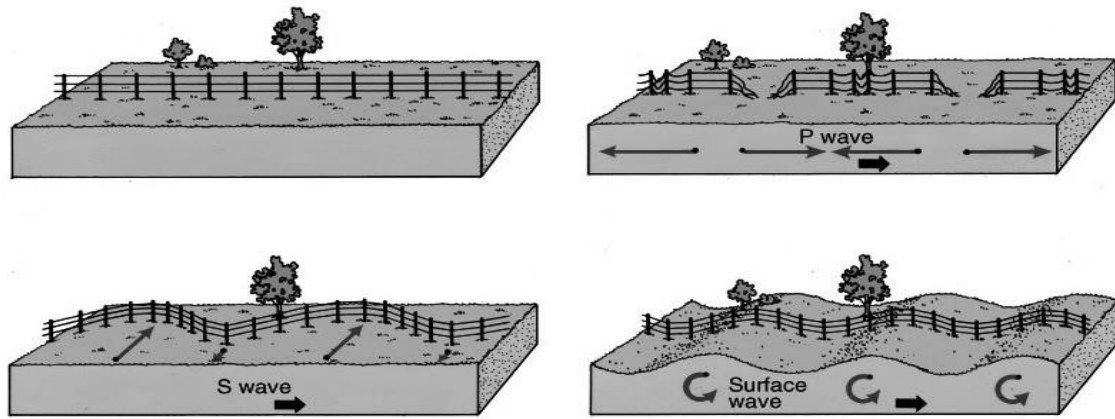


Figure 3 – Movement of Body (P- and S-) waves and Surface (L- and R-) waves of earthquake.

Рисунок 3 – Движение объемных (P- и S-) волн и поверхностных (L- и R-) волн землетрясения.

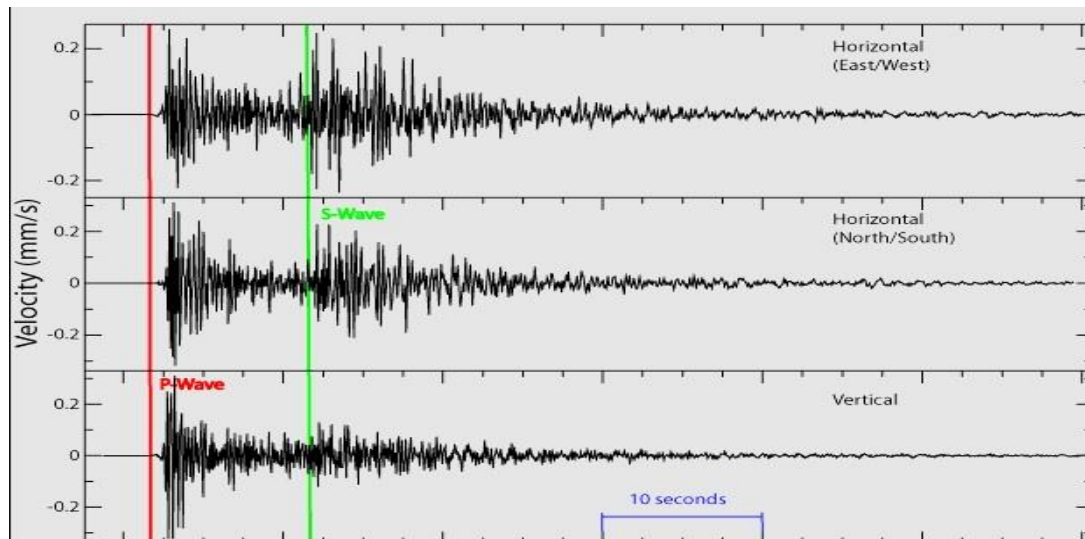


Figure 4 – An example of seismic P- and S-waves on seismograph readings.

Рисунок 4 – Пример сейсмических P- и S-волн на показаниях сейсмографа.

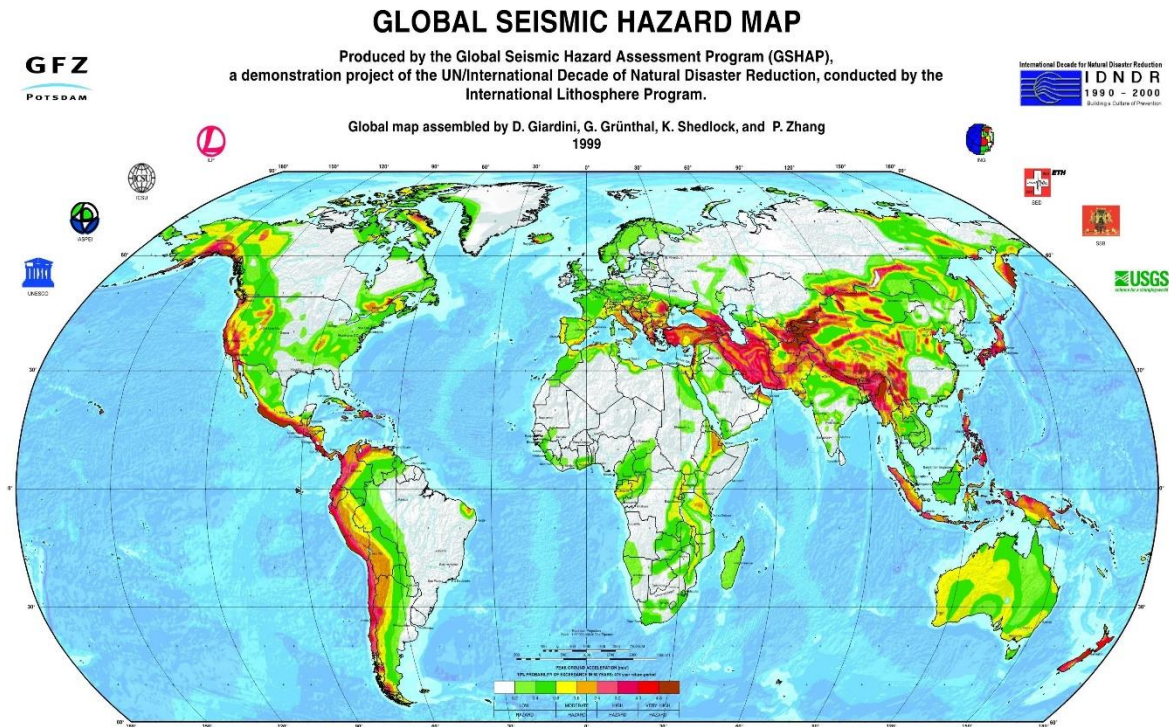


Figure 5 – Seismic map of the world as of 1999.

Рисунок 5 – Сейсмическая карта мира по состоянию на 1999 год.

The intensity of an earthquake can be estimated by the size of cracks in the soil, by the behavior of people in buildings and by the reaction of structures, that is, by the degree of damage to structures. There are several seismic scales in the world. Japan uses the JMA 7-point seismic scale, Europe uses the 12-point European Macroseismic Scale (EMS-98), USA use the 12-point Modified Mercalli scale (MM), and Russia uses the 12-point Seismic Intensity Scale-17 (SHSI-17). When it is necessary to convert the intensity in one scale to the intensity in another scale, you can use table 1, which compares the three seismic scales (JMA, MM and SHSI-17). For example, if an earthquake with an intensity of 3 points on the SHSI-17 scale occurred, then on the MM scale this earthquake will also be estimated at 3 points, and on the JMA scale - already at 1.8 points [5, 7].

Table 1 – Comparison of the main seismic scales.

Таблица 1 – Сравнение основных сейсмических шкал.

Modified Mercalli intensity scale (MM), in points	Seismic Intensity Scale-17 (SHSI-17), in points	Japan Meteorological Agency seismic intensity scale (JMA), in points	Effects on people
0,6	≈1,0	≈0,0	≈ Imperceptible to most people
1,9	≈2,0	≈1,1	≈ Perceptible to some people in the upper stories of multi-story buildings
3,0	≈3,0	≈1,8	≈ Perceptible to most people indoors. Awakens light sleepers
4,2	≈4,0	≈2,4	≈ Perceptible to everyone indoors.
5,6	≈5,0	≈3,1	Frightens some people
6,4	≈6,0	≈3,8	≈ Frightens most people. Some seek escape. Awakens most sleepers
6,6	≈6,5	≈4,0	
7,0	≈7,0	≈4,3	≈ Most people try to escape from danger by running outside. Some people find it difficult to move
8,4	≈8,0	≈5,0	≈ Many people are considerably frightened and find it difficult to move
9,5	≈9,0	≈5,7	≈ Difficult to keep standing
10,2	≈10,0	≈6,2	≈ Impossible to stand; cannot move without crawling
11,0	≈11,0	≈6,9	≈ Thrown off by the shaking and impossible to move at will.
12,0	≈12,0	≈ 7	

Impact of earthquakes on buildings and structures

The study of the consequences of earthquakes showed that buildings of various designs in case of exceeding the calculated seismic impacts, they can receive various damages. In frame buildings, the frame nodes are predominantly destroyed. Severe damage is especially received by the bases of the uprights and the joints of the crossbars with the uprights of the frame, if the dimensions of the latter are insufficient and if they do not have reinforcements in the form of haunches. In large-block and large-panel buildings, there are

cases of mutual displacement of panels, opening of vertical joints, deflection of panels, and even their collapse [6, 8-12]. It should be noted that earthquakes also cause the formation of various vertical, diagonal and cruciform cracks in the masonry, and in some cases lead to the complete destruction of buildings or structures (figures 6-12).



Figure 6 – Damaged house on the island of Crete in Greece as a result of the Arkalochori earthquake in 2021.

Рисунок 6 – Поврежденный дом на острове Крит в Греции в результате землетрясения в Аркалохори в 2021 году.



Figure 7 – Damaged old masonry building built in 1875, during the earthquake in South Napa, California, in 2014.

Рисунок 7 – Каменное здание, построенное в 1875 году и поврежденное во время землетрясения в Южной Напе, Калифорния, в 2014 году.



Figure 8 – Damaged Benedictine Hall turret at Saint Gregory University in Shawnee, Oklahoma USA, in the 2011 earthquake.

Рисунок 8 – Башня Бенедиктинского зала Университета Святого Григори в Шони, штат Оклахома, США, поврежденная во время землетрясения 2011 года.



Figure 9 – Partially collapsed old Inmaculada Concepcion church built in 1841, after the 2020 earthquake on the island of Guayanilla, Puerto Rico.

Рисунок 9 – Частично разрушенная после землетрясения 2020 года на острове Гуаянилья, Пуэрто-Рико церковь Инмакулада Консепсьон, построенная в 1841 году.



Figure 10 – Collapsed building as a result of the 2017 earthquake in Mexico City, Mexico.

Рисунок 10 – Здание, обрушившееся в результате землетрясения 2017 года в Мехико, Мексика.



Figure 11 – Damaged Greek Orthodox church on the island of Crete in Greece as a result of the Arkalochori earthquake in 2021.

Рисунок 11 – Греческая православная церковь на острове Крит в Греции, поврежденная в результате землетрясения в Аркалохори в 2021 году.



Figure 12 – Damaged dome of Catholic temple “Sanctuary of Our Lady of the Angels” as a result of the 2017 earthquake in Mexico City, Mexico.

Рисунок 12 – Купол католического храма “Святылище Богородицы Ангелов”, поврежденный в результате землетрясения 2017 года в Мехико, Мексика.

Strong earthquakes closer to the epicenter leave many traces, such as screes of loose soil, landslides and cracks on the surface of the earth (figures 13-15).



Figure 13 – Liquefaction of sand base as a result of a longitudinal seismic wave in Kobe, Japan.

Рисунок 13 – Разжижение песчаного грунта в результате продольной сейсмической волны в Кобе, Япония.



Figure 14 – Landslides and slope buckling under residential buildings from the 1994 Northridge, California, USA earthquake.

Рисунок 14 – Оползни и потеря устойчивости склона под жилыми зданиями в результате землетрясения в Нортридже, Калифорния, США в 1994 г.



Figure 15 – Rupture of the earth's crust due to a series of earthquakes (along Garlock Fault) in Ridgecrest, California, USA in 2019.

Рисунок 15 – Разрыв земной коры в результате серии землетрясений (вдоль разлома Гарлок) в Риджкресте, Калифорния, США, в 2019 году.

The impact of earthquakes on people and their psyche

As stated at the beginning of this article an earthquake is a dangerous natural disaster for living beings, in particular for people, which occurs suddenly. Despite its short impact on a building or people, often no more than 30 seconds, its devastating consequences are much worse than the consequences of other natural disasters [9-10].

The construction of earthquake-resistant structures of buildings and structures can protect people from the destructive effects of strong earthquakes, but cannot protect them from severe mental trauma resulting from the impact of strong earthquakes when they are in buildings.

An analysis of the behavior and reactions of people in buildings during an earthquake showed that in with strong earthquakes of 7 points and higher, people panic, which poses a certain risk to their lives in such situations.

International seismic scales such as MSK-64[5], the Mercalli scale [6], the new SHSI-17 scale [7] indicate the natural reaction of people who are in buildings during an earthquake. They use people's reactions, such as fear, panic and anxiety, as a yardstick for assessing the intensity of earthquakes. The Mercalli Scale indicates that there is a sense of general terror and flight from home for people who are in a building during a magnitude 7 earthquake. There is such a thing as the so-called "crowd effect", which means that with a large crowd of people in the halls, when an earthquake occurs, their panic can multiply [13-14].

The author of the work [13] gives an example that when analyzing the mental state of law enforcement personnel during the Spitak earthquake that occurred on the territory of the Armenian SSR in 1988, medical scientists recorded seismophobia in all examined patients, i.e. a feeling of fear of repeated shocks. The severity and severity of fear was inversely proportional to the mental stability of a person. Seismophobia was the cause of panic among the personnel who arrived for reinforcement, which led to the loss of efficiency of the above staff [13-16, 17-21].

Building structures and their influence on people's reaction to earthquakes and optimization of people's evacuation time.

Building structures during earthquakes have a strong influence on people's behavior. The vibration parameters of building structures differ on different floors [13-17].

In works [14-17] it was pointed out and justified that the reaction of people during an earthquake should be assessed only on the first floor of the building [18], since the higher the floor, the greater the intensity of the earthquake. If the earthquake strength on the first floor is 7 points, then on the second floor and above it will be 8 points.

If we compare the reaction of people in buildings and in open areas, the authors [13-16] conclude that people in buildings experience a seismic effect by almost 1 point more than those in open areas.

During strong earthquakes, people have a natural reaction to the threat and the desire to leave the building and go to a safe open space. The set of rules for construction in seismic areas dictates to the designer the time for evacuating people from the building [4, 17] and this means that the reaction of people is predetermined even when designing an earthquake-resistant building.

Clause 3.4 of the Code of Practice for Building in Seismic Areas [4] requires that escape routes pass through a long series of intermediate spaces such as corridors, lobbies, stairwells, etc. Because of this rule, escape routes in earthquake-resistant buildings where there are halls, for example, cinemas, theaters, mosques, etc., are long. The time required for the evacuation

of people from the auditoriums ($t_{\text{additional}}$) according to fire regulations varies from 1.5 to 4.5 minutes [13].

An important role in the duration of the evacuation of people is played by the number of floors in the building [13]. The higher the floor, the more time citizens need to evacuate the building. In public buildings, the time for the evacuation of citizens from the upper floors to the lower ones along the staircase is determined by the formula 1:

$$t_{\text{calc}} = \frac{L}{V} \quad (1)$$

where: L is the length of the path (evacuation) along the flight of stairs, V is the speed of people in m/min.

Engineering seismological classification of the degree of human reaction (E) during an earthquake can be found in the work of scientists from the Institute of Physics of the Earth named after. O. Yu. Schmidt [13, 19]:

- ($E = 0$) - there are no reactions at all: a person does not notice anything, does not feel anything, does not react to anything;
- ($E = 1$) - the presence of weak sensations: a person experiences a barely noticeable bewilderment, behavior does not change, in the case of sleep, he wakes up calmly, but does not fully understand and is unaware of the reason;
- ($E = 2$) - the presence of a strong sensation (anxiety): a person can pay attention, clearly feels, is able to estimate the duration, direction, and some phases of oscillation, in case of sleep - wakes up feeling that he was awakened;
- ($E = 3$) - fright: a person is frightened, but retains the ability to assess the duration, direction, and some phases of oscillations, tends to leave the building;
- ($E = 4$) - a strong fright: a person in this case is very frightened, shows a desire to run out of the building, and runs out;
- ($E = 5$) - panic: a person falls into a state of panic, screams in hysterics, may lose balance, may jump out of a window;
- ($E = 6$) - the strongest panic: a person cannot stand on his own without support, he reacts very badly to everything that surrounds him;
- ($E = 7$) - complete shutdown: in this case, the person falls into a state of stupor and loses consciousness.

Earthquakes that occur in the same construction area with the same soil conditions form a different level of seismic effects in the structures of buildings and constructions with different design solutions. The highest level of seismic impact is formed in buildings and constructions, in which the value of the period of the fundamental tone of vibrations coincides with the value of the period of soil vibrations. And vice versa, the seismic impact will be minimal in the structures of buildings and constructions, in which the period of the fundamental tone of vibrations differs significantly from the period of soil vibrations.

Therefore, in order to reduce seismic effects on people, on the building structures of buildings and constructions, it is advisable to use seismic isolation, which allows you to change the dynamic scheme of the object and thereby reduce seismic effects in it and their negative nature on people and building structures.

Significance of architectural monuments of cultural and religious significance in Syria in the culture and life of Muslim society

Architectural monuments of cultural and religious significance are of great importance in the culture and life of Muslim society. The main place of worship for Muslims is the mosque. Mosques have played and are playing a very important role in their lives, because in

them they pray and listen to sermons. There are ancient mosques everywhere where there were Muslims. For example, in Spain, which was once conquered by the Arabs, there are many ancient mosques. In all Arab countries, including Syria, there are many ancient and modern mosques.

In Syria, the Great Mosque in Aleppo (figure 16) is one of the largest and oldest Muslim sites of religious significance in this country [2, 3, 22-24] and is located in the old part of the city of Aleppo.

The architecture of the mosque belongs to the Islamic period of the Umayyad Dynasty and was built in 715. The plan (figure 17) of the Great Mosque is rectangular with a rectangular courtyard measuring 105x78m. Surrounded by galleries with square and rectangular columns. The columns are built of limestone and lined with marble. In the courtyard there is a column and two fountains for the ablution of believers before prayer. This courtyard is famous for its multicolored stone pavement of intricate geometric patterns. In the north-western corner rises a square minaret about 45 m high, measuring 4.7 x 4.7 m in plan. The minaret was built in 1095 and stands on a stone foundation. The mosque was damaged as a result of past earthquakes and hostilities. It is included in the UNESCO World Heritage List.

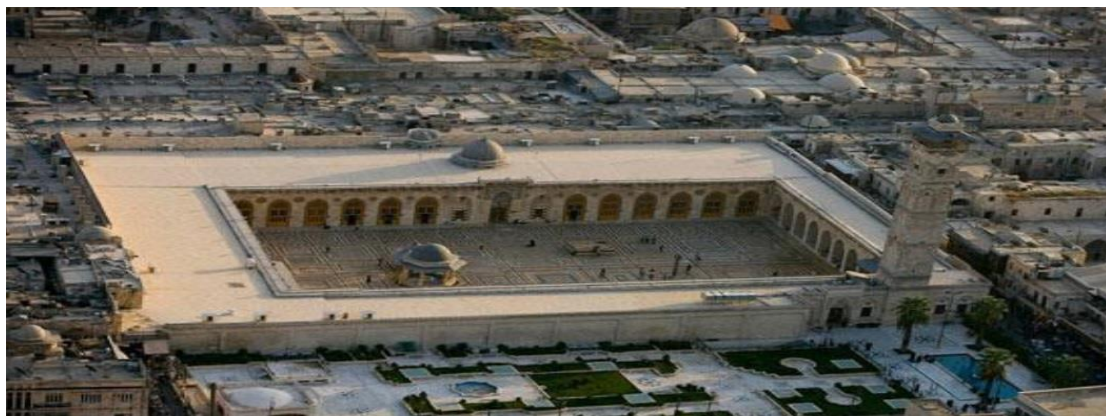


Figure 16 –The Great Mosque in Aleppo, Syria.

Рисунок 16 – Большая мечеть в Алеппо, Сирия.

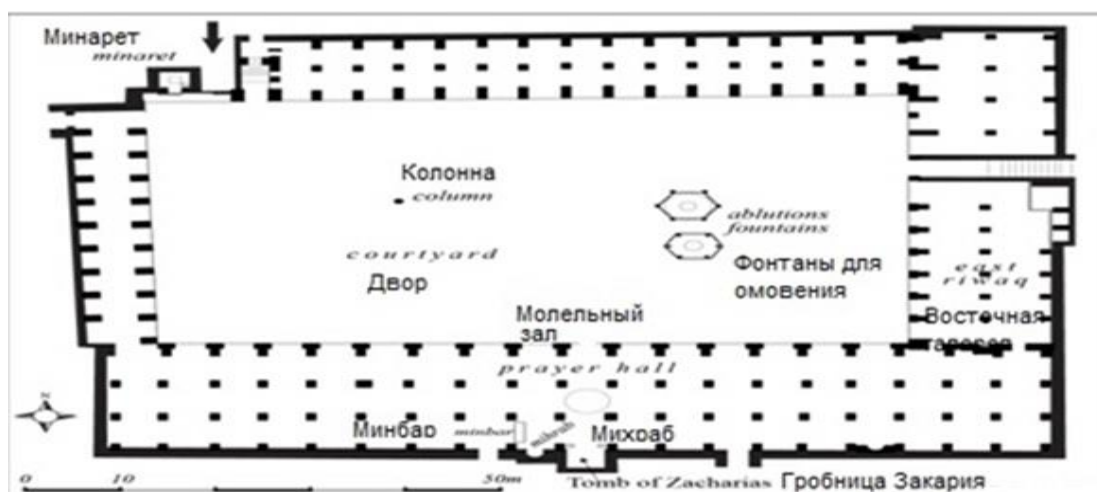


Figure 17 – The Plan of the Great Mosque in Aleppo, Syria.

Рисунок 17 – План Большой мечети в Алеппо, Сирия.

Buildings and constructions of religious significance, such as Muslim mosques, are primarily public buildings, and a place where a large number of people gather during prayer. If an earthquake occurs at this time, people's reactions such as panic, fear, stampede, etc. will inevitably follow.

If a person prays, then at that time he is concentrated on this action. The shocks and vibrations from an earthquake lead to different reactions in different people from panic and fear to trance or mental illness, depending on the innate, psycho-physiological qualities and type of the human nervous system. After all, melancholic, sanguine, phlegmatic and choleric people can react to this in different ways. Therefore, there is a need to protect people and building structures of buildings and structures by reducing the seismic impact using traditional or non-traditional methods of seismic protection

Seismic protection of the Great Mosque in Aleppo

An analysis of the seismic situation in Syria and the city of Aleppo [2-3,22-24] in particular showed that the territory of this country and this city is subject to seismic effects of different intensity and Peak Ground Acceleration (PGA), (tables 2-3).

Table 2 – Seismicity of the territory of the city and province of Aleppo, Syria in points according to the scale of seismic intensity SHSI-17.

Таблица 2 – Сейсмичность территории города и провинции Алеппо, Сирия в баллах по шкале сейсмической интенсивности ШСИ-17.

Locality name	I ₍₁₀₀₎ , Intensity (in points) for earthquake return period T _{eq} ≈100 years	I ₍₅₀₀₎ , Intensity (in points) for earthquake return period T _{eq} ≈500 years	I ₍₁₀₀₀₎ , Intensity (in points) for earthquake return period T _{eq} ≈1000 years	I ₍₂₀₀₀₎ , Intensity (in points) for earthquake return period T _{eq} ≈2000 years
Aleppo	VII	VII	VIII	IX

Table 3 – Peak Ground Acceleration (PGA) values in fractions of (g) for the city and province of Aleppo, Syria.

Таблица 3 – Значения пикового ускорения грунта (PGA) в долях (g) для Алеппо, Сирия.

Locality name	PGA, (g) peak ground acceleration for earthquake return period T _{eq} ≈100 years	PGA, (g) peak ground acceleration for earthquake return period T _{eq} ≈500 years	PGA, (g) peak ground acceleration for earthquake return period T _{eq} ≈1000 years	PGA, (g) peak ground acceleration for earthquake return period T _{eq} ≈2000 years
Aleppo	0,051	0,0516	0,1885	0,4691

It is proposed to protect people and building structures of buildings and constructions from the negative consequences of earthquakes [25-28] to use an unconventional method of

seismic protection in the form of seismic isolation of the entire building of the mosque to reduce seismic impact.

For seismic isolation of the Great Mosque in Aleppo, it is proposed to use a High Damping Rubber Bearing (HDRB) with a high ability to dissipate energy, designed for maximum movement of equal ± 200 mm. The rubber compound used in the production of the HDRB support has a dynamic shear modulus (G_{din})=0.4 MPa (figures 18-19).

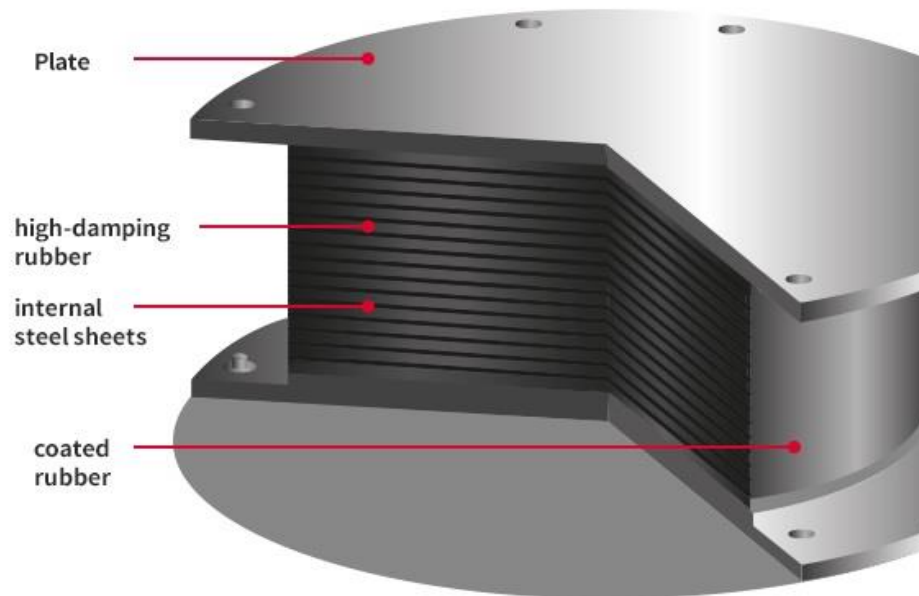


Figure 18 – High Damping Rubber Bearing (HDRB) in section.

Рисунок 18 – Сейсмоизолирующая резинометаллическая опора с высокой способностью к диссипации энергии в разрезе.

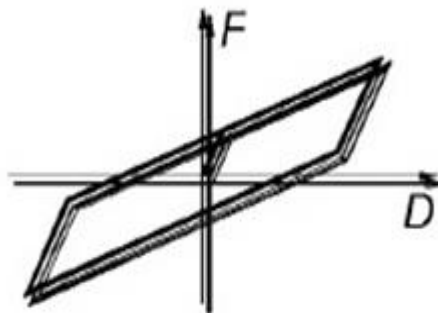


Figure 19 – Idealized “force - displacement” (F–D) relationship for a High Damping Rubber Bearing (HDRB).

Рисунок 19 – Идеализированное соотношение “усилие – перемещение” (F–D) для резинометаллических опор высокого демпфирования (HDRB).

The total thickness of rubber (T_r) provides the low horizontal stiffness (K_h) needed to lengthen the fundamental natural period of the system [2-3,9], whereas the close spacing of

the intermediate steel shim plates provides a large vertical stiffness and critical load capacity for a given shear modulus (G) and bonded rubber area (A_b). However, steel shim plates do not affect the horizontal stiffness of the bearing.

It is possible to calculate the horizontal stiffness factor (K_h) of the elastomeric bearing by the formula 2:

$$K_h = \frac{GA_b}{T_r} \quad (2)$$

The modulus of compression (E_c) for a single solid round rubber layer, assuming that the rubber is incompressible, given by the formula 3:

$$E_c = 6GS^2 \quad (3)$$

Shape factor, which can be calculated by the formula 4:

$$S = \frac{A_1}{A_2} \quad (4)$$

Where:

S - shape factor, which is a dimensionless geometric parameter defined for a single rubber layer;

A_1 - loaded area;

A_2 - seismic isolation surface area.

The vertical stiffness factor (K_v) can be calculated using formula 5:

$$K_v = \frac{E_c \cdot A_b}{T_r} = \frac{6GS^2 A_b}{T_r} \quad (5)$$

The vertical and horizontal stiffness of the elastomeric bearing are related. For example, for circular bearings can be calculated using formula 6:

$$\frac{K_v}{K_h} = 6S^2 \quad (6)$$

The shape factor for a circular bearing with a diameter d_g is given by the formula 7 and made of rubber layers of thickness T_r :

$$S = \frac{\left(\frac{\pi d_g^2}{4}\right)}{\pi d_g T_r} = \frac{d_g}{4T_r} \quad (7)$$

The shape factor for a square bearing of sides $a \cdot a$ is given by the formula 8 and made of rubber layers of thickness T_r :

$$S = \frac{a \cdot a}{2T_r(a + a)} = \frac{a}{4T_r} \quad (8)$$

The shape factor for a rectangular bearing of sides $a \cdot b$ is given by the formula 9 and made of rubber layers of thickness T_r :

$$S = \frac{a \cdot b}{2T_r(a + b)} \quad (9)$$

And, finally, a design model (figure 20) was built corresponding to the state of the mosque after seismic isolation and the calculation was performed in the LIRA-SAPR 2016 software package, in which it is possible to obtain all the necessary system parameters, for example, loads in elements, displacements, vibration periods, visualization of vibration modes [25-36].

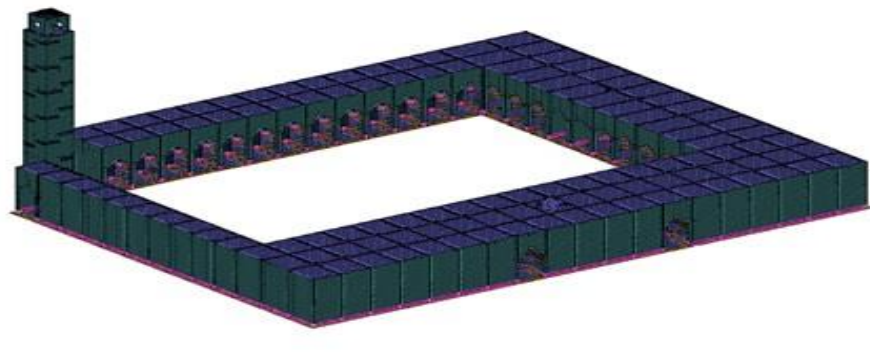


Figure 20 – Design model of the Great Mosque in Aleppo with High Damping Rubber Bearing (HDRB), installed under the building.

Рисунок 20 – Проектная модель Большой мечети в Алеппо с резинометаллическими опорами высокого демпфирования (HDRB), установленными под зданием.

The assessment and calculation of the seismic resistance of the building showed the effectiveness of seismic isolation in this case (figure 21). More about this may be written in future articles.

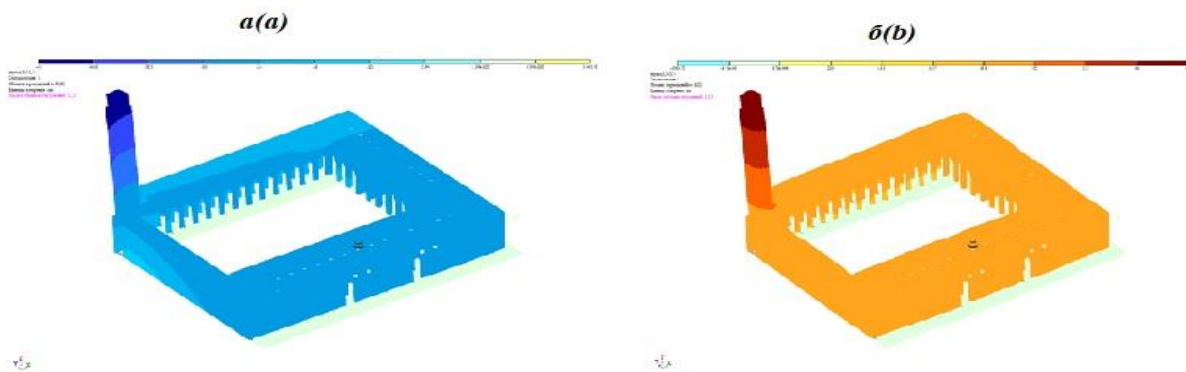


Figure 21 –Displacement mosaics along X and Y after seismic isolation of the building of the Great Mosque in Aleppo:

a – displacement mosaic along X; *b* – displacement mosaic along Y.

Рисунок 21 – Мозаики перемещений вдоль X и Y после сейсмоизоляции здания Большой мечети в Алеппо:

a – мозаика перемещений вдоль X; *b* – мозаика перемещений вдоль Y.

It turned out that High Damping Rubber Bearings (HDRB), have the best characteristics such as very high damping capacity, with an equivalent damping factor of more than 15 % for a large earthquake, and good recoverability without additional dampers, in other words ability to recover to its original position after seismic impact.

All of the above made it possible to reduce the impact of the earthquake on building structures, which would lead to a decrease in negative reactions of people in buildings and structures, such as fear and seismophobia, leading to panic.

Conclusions

To reduce the negative impact of earthquakes on people, on buildings and structures and on the environment, the following measures should be taken:

- construction of buildings and structures, taking into account and based on the normative maps of seismic zoning;
- increasing the seismic resistance of existing buildings and structures using non-traditional methods of seismic strengthening, such as seismic isolation;
- as a successful and effective example of increasing the seismic resistance of buildings, we can cite the proposed use of seismic isolation of the Great Mosque building in Aleppo, which is one of the significant architectural monuments of Syria;
- pay special attention to seismic hazard forecast;
- effective organization of rescue services, medical assistance and firefighters;
- creation of emergency supplies of tents, medicines, clothing, heating appliances, food, drinking water, etc.;
- educating people and teaching them the rules of behavior in seismic hazard conditions in order to avoid panic and increase the survival rate.

References / Список литературы

1. Grunthal, G. Seismic hazard assessment for Central, North and Northwest Europe: GSHAP Region 3. *Ann. Geophys.* Vol. 42 No. 6 (1999).
2. Ambraseys, N. N. and Jackson, J. A. 1981. Earthquake hazard and vulnerability in the northeastern Mediterranean: The Corinth earthquake sequence of February-March 1981. *Disasters* 5(4): 355–368.
3. Aldrebi Z. A. Seismic hazard of the territory of Syria. *Earthquake Engineering. Constructions Safety.* -2019. No. 6. pp. 43–48. (In Russian).
4. SP 14.13330.2018 Construction in seismic areas. Updated edition of SNiP II-7-81 *, Moscow: Standartinform, 2018 - 116 p. (In Russian).
5. GOST R 57546-2017 Earthquakes. Seismic intensity scale. M.: Standartinform, 2017. – 32 p. (In Russian).
6. Medvedev S.V., Sponheuer V., Karnik V. Seismic intensity scale MSK-64. Moscow: Interdepartmental Geophysical Committee under the Presidium of the Academy of Sciences of the USSR, 1964. 17 p. (In Russian).
7. Dengub V. M., Smirnov V. M. Seismic scale of Mercalli-Cancani. Units of quantities: dictionary-reference book. M., 1990. pp. 134–135. (In Russian).
8. Vintzileou, E., Zagkotsis, A., Repapis, C., Zeris, C.: Seismic behaviour of the historical structural system of the island of Lefkada, Greece. *Constr. Build. Mater.* 21, 225–236 (2007).

9. Makarios, T., Demosthenous, M.: Seismic response of traditional buildings of Lefkas Island Greece. *Eng. Struct.* 28, 264–278 (2006).
10. Aizenberg Ya. M. Seismic stability of structures and settlements, innovative solutions / Ya. M. Aizenberg, V. I. Smirnov // *Urban planning*. - 2013. - No. 1 (23). – P. 57–64. (In Russian).
11. Amosov A. A. Fundamentals of the theory of seismic stability of structures / A. A. Amosov, S. B. Sinitsyn. - M. : Publishing House of ASV, 2010. - 134 p. (In Russian).
12. Arnold K. Architectural design of earthquake-resistant buildings: translated from English. / K. Arnold, R. Reiterman. - M. : Stroyizdat. 1987. - 196 p. (In Russian).
13. Maslyaev, A. V. Seismic protection of buildings in settlements to preserve the life and health of people during an earthquake: monograph / A. V. Maslyaev; Ministry of Education and Science Russian Federation, Volgograd. state tech. university. - Volgograd: VolgGTU, 2018. - 149 p. (In Russian).
14. Nazarenko Yu. V., Kolos I.V. Mental state and working capacity of victims; Research Institute of General and Forensic Psychiatry. V. P. Serbsky // *Mental disorders in victims of an earthquake in Armenia: a collection of scientific papers* M., 1989. pp. 41–48. (In Russian).
15. Maslyaev V.N. Accounting for the design of earthquake-resistant buildings of the reaction of people during an earthquake // *Express-inform. VNIIS Gosstroy of the USSR: Ser.14. Seismic construction*. 1986. Issue. 6. pp. 40–49. (In Russian).
16. Maslyaev V.N. Influence of oscillations of building structures during earthquakes on people's reaction // *Express-inform. VNIIS Gosstroy of the USSR: Ser. 14. Seismic construction*. 1987. Issue. 6. pp. 18–21. (In Russian).
17. Martemyanov A.I. Design and construction of buildings and structures in seismic regions: Textbook for universities. – M.: Stroyizdat, 1985. – 255 p. (In Russian).
18. SP 118.13330.2012. Public buildings and structures. Updated edition of SNiP 31-06-2009. M. : Ministry of Regional Development of Russia, 2012. -78 p. (In Russian).
19. Ershov I. A., Shebalin N. V. The problem of earthquake intensity scale design from the point of view of seismologists; Academy of Sciences of the USSR, Institute of Physics of the Earth named after O. Yu. Schmidt // *Forecast of seismic effects. Issues of engineering seismology*. M., 1984. Issue. 25, pp. 78–95. (In Russian).
20. Abdurashidov K.S., Vedernikov A.A. Consequences of the Gazli earthquake // *Architecture and construction of Uzbekistan*. 1984. No. 8, pp. 12–17. (In Russian).
21. Aizenberg, Ya.M., Response spectra during the Gazli earthquake on May 17, 1976, and adaptive behavior of systems with varying stiffness, *Ref. inform. CYNIS: Ser. 14. Seismic construction*. 1977. No. 9, pp. 21–28. (In Russian).
22. Aldrebi Z. A., Monitoring and certification of the most famous architectural monuments in Syria / Z. A. Aldrebi // *Izv. Petersburg state University of Communication*. - SPb. : PGUPS, 2018.– V. 15(2).– pp. 302–310. (In Russian).
23. Belash T. A. Analysis of damage to the architectural monuments of Syria resulting from earthquakes and hostilities / T. A. Belash, Z. A. Aldrebi // *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. - 2016. - No. 5. – pp.58–63. (In Russian)
24. Alafandi R., Rahim, A. A. Umayyad Mosque in Aleppo yesterday, today and tomorrow. *International Journal of Arts & Sciences*, 2014. 07 (05) p.p.319–347.
25. SP 20.13330.2016 Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85 *, M.: TsNIISK named after V.A.Kucherenko, 2016. – 107 p. (In Russian).

26. SP 15.13330.2020. Stone and reinforced stone structures. Updated edition of SNiP II-22-81 * (with Amendments No. 1, 2 - M.: TsNIISK named after V.A.Kucherenko, 2020. - 131 p. (In Russian).
27. SP 22.13330.2016. SNiP 2.02.01-83* Foundations of buildings and structures. - Input. 2017-07-01. - M.: Standartinform, 2017. – 228 p. (In Russian).
28. SP 268.1325800.2016. Transport facilities in seismic regions. Design rules. - Input. 2017-06-17. - M.: Standartinform, 2017. – 57 p. (In Russian).
29. Birbraer A.N. Calculation of structures for seismic resistance / A.N. Birbraer. - St. Petersburg. : Nauka, 1998. - 255 p. (In Russian).
30. Puzyrev N. N. Methods and objects of seismic research. Introduction to general seismology / N. N. Puzyrev. - Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, NITs OIGGM, 1997. 301 p. (In Russian).
31. Tyapin A. G. Accounting for the interaction of structures with the base in the calculations for seismic effects / A. G. Tyapin. - M. : Publishing House of ASV, 2014. - 136 p. (In Russian).
32. EN 1998-1: 2004. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, European Committee for Standardization, Brussels, 232 pp.
33. Shablinsky G. E. Natural dynamic studies of building structures of residential and public buildings / G. E. Shablinsky, D. A. Zubkov. - M. : Publishing House of ASV, 2009. - 216 p. (In Russian).
34. Eisenberg, Ya.M. Methodical recommendations for the design of seismic isolation using rubber-metal supports / Ya.M. Eisenberg and V.I. Smirnov, R.T. Akbiev // Moscow: RASS, 2008, - 46 p. (In Russian).
35. Rutman, Yu. L. Determination of optimal damping parameters in seismic isolation systems / Yu.L. Rutman, N.V. Kovaleva, G.V. Davydov // Engineering and construction journal, No. 5 (40), 2013, ed. SPbSPU, p.p.107-115. (In Russian).
36. Mkrtychev O.V., Bunov A.A. Calculation on displacements features of seismic isolated building. Vestnik MGSU. 2014, no. 6, pp. 63-70. (In Russian).

Информация об авторе/Information about author

Альдребби Зиад Ахмад, преподаватель-исследователь, инженер-строитель, аспирант, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». Санкт-Петербург, Российская Федерация. ziald67@gmail.com

Ziad Ahmad Aldrebi, lecturer-researcher, civil engineer, postgraduate, “Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University”. Saint Petersburg, Russian Federation. ziald67@gmail.com

УДК 355.7

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-81-95](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-81-95)

Теоретические и экспериментальные исследования

Методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций

Короленок Л.М.¹, Снегирев А.Е.², Сорокин Н.В.²

¹Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева.

Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Центр Государственной Экспертизы Федеральной службы войск национальной гвардии РФ. Москва, Российская Федерация

Аннотация: Статья посвящена вопросу разработки научно-методического аппарата, позволяющего при реконструкции произвести поверочные расчеты котлованного специального фортификационного сооружения в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций. В частности, в данной статье авторами предложена и освещена методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций. Теоретическая значимость описанной методики заключается в обосновании применения теорий механики континуума, упругости и пластичности и методов конечных элементов и начальных напряжений при расчете несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва в процессе проектирования реконструкции КСФС. Практическая значимость разработанной авторами методики заключается в возможности применения для оценки фактического состояния несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений после воздействия динамических нагрузок.

Ключевые слова: котлованные специальные фортификационные сооружения (КСФС), сейсмозрывные волны ядерного взрыва, реконструкция, модель расчета

Для цитирования: Короленок Л.М., Снегирев А.Е., Сорокин Н.В. Методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. №4. С.81-95. DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-81-95](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-81-95)

Вклад авторов:

Короленок Л.М. – общее руководство работой, редактирование чернового варианта статьи. Снегирев А.В., Сорокин Н.В. – анализ экспериментальных данных, подготовка черновой версии статьи, ее окончательная редакция.

@ Л.М. Короленок, А.Е. Снегирев, Н.В. Сорокин, 2022

Финансирование:

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Method of calculation of reconstructed excavation special fortifications in non-rock soils on the impact of seismic waves of a nuclear explosion, taking into account the actual state of the load-bearing structures

Leonid M. Korolenok¹, Alexey E. Snegirev², Nikita V. Sorokin²

¹Military Institute (Engineering and Technical) Military Academy of Material and Technical Support named after Army General A.V. Khrulev. Saint Petersburg, Russian Federation

²Center for State Expertise of the Federal Service of the National Guard Troops of the Russian Federation. Moscow, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to the development of a scientific and methodological apparatus that allows during reconstruction to make verification calculations of a special fortification in non-rock soils for the impact of seismic waves of a nuclear explosion, taking into account the actual state of the load-bearing structures. In particular, in this article, the authors proposed and consecrated a method for calculating reconstructed excavation special fortifications in non-rock soils on the impact of seismic waves of a nuclear explosion, taking into account the actual state of the load-bearing structures. The theoretical significance of the described technique is to substantiate the application of the theories of continuum mechanics, elasticity and plasticity, and methods of finite elements and initial stresses in the calculation of load-bearing structures of special excavation fortifications to the effects of seismic waves of a nuclear explosion during the design of the reconstruction of the KSFS. The practical significance of the methodology developed by the authors lies in the possibility of application to assess the actual condition of the bearing structures of the excavated special fortifications after exposure to dynamic loads.

Keywords: excavated special fortification structures (CSFS), seismic explosive waves of a nuclear explosion, reconstruction, calculation model

For citation: Leonid M. Korolenok, Alexey E. Snegirev, Nikita V. Sorokin. Method of calculation of reconstructed excavation special fortifications in non-rock soils on the impact of seismic waves of a nuclear explosion, taking into account the actual state of the load-bearing structures. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 4, pp. 81-95

DOI [10.37153/2618-9283-2022-4-81-95](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-4-81-95)

Contribution of the authors:

Leonid M. Korolenok – general management of the work, editing of the draft version of the article. Alexey E. Snegirev, Nikita V. Sorokin – analysis of experimental data, preparation of a draft version of the article, its final revision.

Funding:

The study had no sponsorship.

Conflict of interest:

The authors declare that there is no conflict of interest.

1. Введение

подавляющее большинство специальных фортификационных сооружений котлованного типа, возведенных в порядке заблаговременной военно-инженерной подготовки территории страны к военным действиям, было построено в советское время в период с 1950 по 1970 годы. Внедрение активной системы защиты (ПРО) позволило сделать КСФС основной сдерживающей силой при первых наступательных действиях противника.

В условиях ограниченного финансирования строительства в Министерстве обороны Российской Федерации и для ускорения сроков постановки на боевое дежурство котлованных специальных фортификационных сооружений необходимо пойти по пути реконструкции или капитального ремонта существующих КСФС.

Однако, в современных условиях оценка степени защиты котлованных специальных фортификационных сооружений при реконструкции в Министерстве обороны Российской Федерации характеризуется наличием ряда противоречий.

Во-первых, практика эксплуатации котлованных фортификационных сооружений в сейсмически активных районах показала, что КСФС получают повреждения, снижающие их защитные свойства, однако в нормах проектирования природная сейсмика как расчетное воздействие отсутствует.

Во-вторых, дефекты и повреждения, получаемые КСФС в процессе эксплуатации, снижают защитные свойства данных сооружений, при этом отсутствуют методики по оценке степени защиты КСФС с учетом фактического состояния несущих конструкций при реконструкции.

Вышеперечисленные противоречия могут быть решены разработкой научно-методического аппарата, позволяющего при реконструкции произвести поверочные расчеты котлованного специального фортификационного сооружения в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций на основе теорий механики континуума, упругости и пластичности и методов конечных элементов и начальных напряжений.

В процессе разработки вышеуказанного научно-методического аппарата авторами была предложена методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций, ключевые аспекты которой изложены в данной статье.

2. Основные положения методики

Методика предназначена для учета фактического состояния несущих конструкций при проектировании реконструкции котлованных специальных фортификационных сооружений, рассчитываемых на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва.

Сущность методики состоит в том, что после проведения визуального и детального обследования выполняется поверочный расчет, целью которого является определение фактического состояния несущих конструкций за всю историю эксплуатации котлованного специального фортификационного сооружения, при этом учитываются и дефекты, выявленные на предыдущем этапе обследования. Общая схема алгоритма расчета представлена на рисунке (рис. 1).

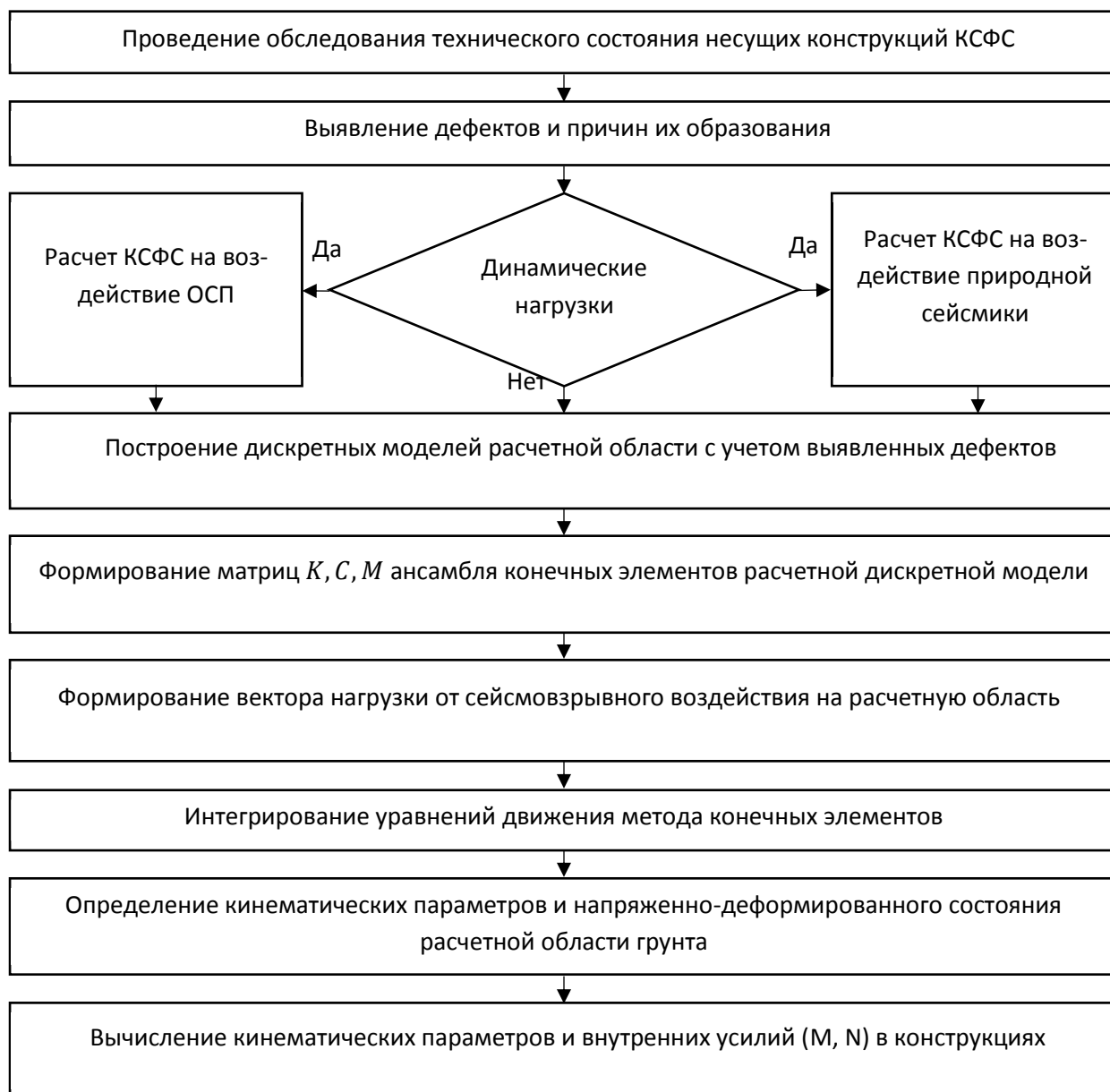


Рисунок 1 – Общая блок-схема алгоритма расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений

Figure 1 – General block diagram of the algorithm for calculating reconstructed excavation special fortifications

Оценка фактического технического состояния несущих конструкций КСФС, в том числе защищенности и живучести КСФС в целом или его отдельных элементов для принятия решения по реконструкции производится на основе результатов обследования сооружения.

Обследование технического состояния КСФС проводится в два этапа. На 1 этапе выполняют визуальное обследование несущих конструкций для выявления значительных и критических дефектов, влияющих на несущую способность, жесткость и устойчивость. На 2 этапе проводят детальное обследование поврежденных несущих конструкций обде-

лок в соответствии с нормативными документами [1, 2]. По данным обследования выявляют участки с дефектами.

Целью визуального обследования является первичная (оперативная) оценка технического состояния КСФС за все время эксплуатации. Результатами проведения предварительного (визуального) обследования являются: схемы и ведомости дефектов и повреждений с фиксацией их мест и характера; результаты проверки наличия характерных деформаций сооружения и его отдельных строительных конструкций (прогибы, крены, выгибы, перекосы, разломы и т. п.); выявление аварийных участков (при наличии).

Если результатов визуального обследования для принятия решения по реконструкции недостаточно, и при визуальном обследовании обнаружены дефекты и повреждения, снижающие прочность и устойчивость несущих конструкций сооружения, то переходят к инструментальному обследованию.

На основе результатов инструментального обследования устанавливаются цели, задачи, виды и характер повреждений несущих конструкций необходимые для принятия решения о дальнейшей реконструкции КСФС.

В ходе проведения обследования дается оценка технического состояния железобетонных несущих конструкций на основе:

- определения геометрических размеров конструкций и их сечений;
- сопоставления фактических размеров конструкций с проектными размерами; физико-механических свойств материалов конструкций;
- наличия трещин, сколов и разрушений; месторасположения;
- характера трещин и ширины их раскрытия, состояния защитных покрытий, деформаций конструкций;
- признаков нарушения сцепления арматуры с бетоном, наличия разрывов арматуры, степени коррозии бетона и арматуры.

С целью уточнения результатов обследования проводится поверочный расчет несущих конструкций КСФС на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва. Расчет выполняется в специализированном программном комплексе на базе метода конечных элементов в форме перемещений, предусматривающий следующие этапы расчета [4]:

- разбиение рассматриваемой области на конечные элементы, и подготовка топологической, геометрической и физической информации;
- построение для выделенных конечных элементов на основе информации зависимых переменных кусочно-полиномными функциями с известными параметрами для каждого конечного элемента, соответствующих матриц (жесткости, масс, вязкости) и векторов, определяющих зависимости между реакциями и перемещениями в узлах элементов;
- формирование разрешающей системы уравнений, дающих значение полей перемещений, скоростей и ускорений узловых точек.

Для полноценной картины напряженно-деформирования состояния расчет выполняется в пространственной постановке с применением нелинейных моделей работы нескального грунта и материала несущих конструкций.

Для выполнения пространственного расчета котлованных специальных фортификационных сооружений на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва выбирается область, включающая нескальный грунт, вмещающий котлованное специальное фортификационное сооружение [4]. Формирование дискретной модели расчетной области подразумевает разбиение грунтового массива на гексаэдральные конечные элементы с восемью узлами, а конструкции КСФС разбиваются на оболочечные конечные элементы с четырьмя узлами. При этом густота элементов увеличивается в зоне ограждающих конструкций и уменьшается по мере удаления от сооружения к границам области. Изменение размеров элементов от слоя к слою должно быть плавным, чтобы исключить эффекты от-

ражения при моделировании распространения волн в грунтовом массиве. Опыт показывает, что если размеры соседних элементов отличаются не более чем на 20-30%, то упомянутыми эффектами можно пренебречь. Пример дискретной области представлен на рисунке (рис. 2).

Если грунтовый массив состоит из различных слоев с ярко выраженными физико-механическими характеристиками, то это учитывается путем моделирования каждого слоя грунта элементами с конкретными физико-механическими характеристиками (модуль упругости, коэффициент Пуассона и др.), при этом деформативные свойства элемента каждого слоя грунта могут описываться различными уравнениями состояния.

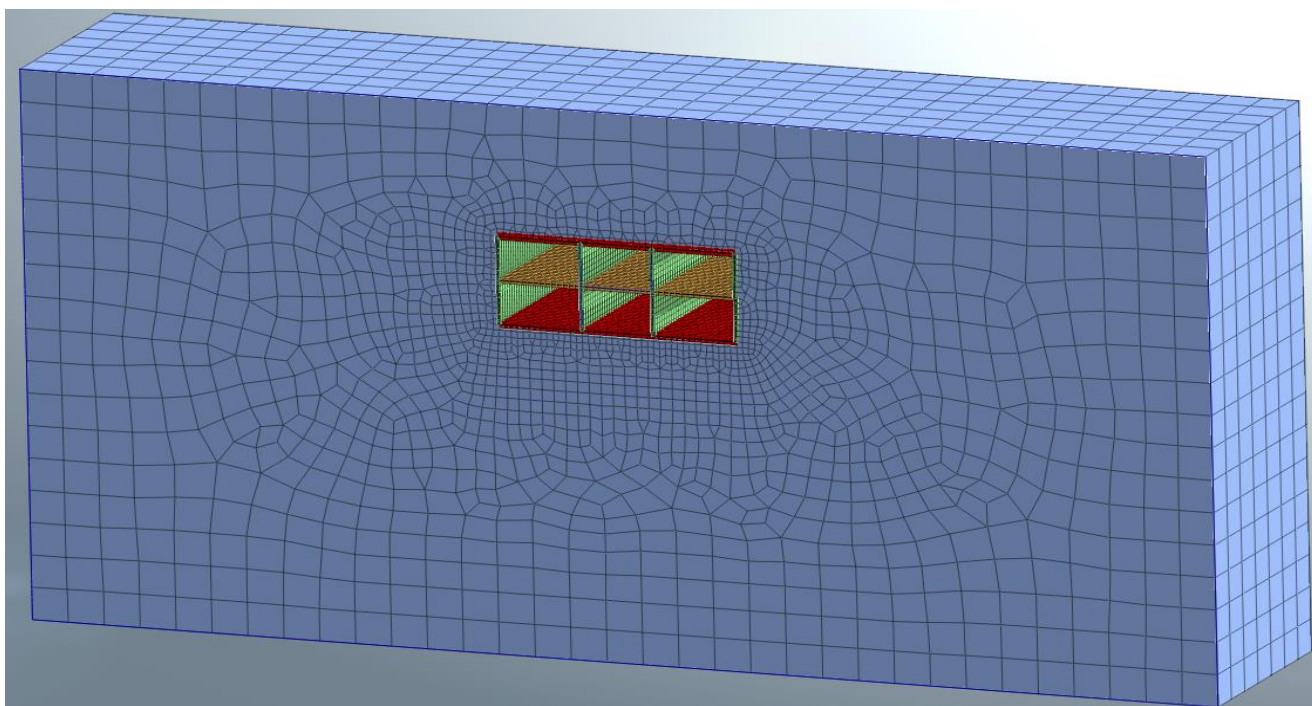


Рисунок 2 – Дискретная модель расчетной области

Figure 2 – Discrete model of the computational domain

Конечно-элементная модель ограждающих конструкций КСФС строится на основе пакета типовых конечных элементов. Железобетонные конструкции разбиваются на оболочечные конечные элементы, в работе элементов такого типа могут быть учтены деформации изгиба и сдвига. Для учета повреждений и дефектов в железобетонных конструкциях, выявленных при обследовании несущих конструкций, используются такие же стандартные оболочечные конечные элементы. При этом их физико-механические свойства назначаются по результатам обследования.

При разработке дискретной схемы необходимо учитывать и тот факт, что узлы конечных элементов конструкции должны взаимодействовать с соответствующими узлами грунта. Исходя из этого степень дискретизации ограждающих конструкций КСФС должна быть увязана с плотностью конечно-элементной сетки области грунта.

При разработке дискретной схемы необходимо учитывать и тот факт, что узлы конечных элементов конструкции должны взаимодействовать с соответствующими узлами грунта. Исходя из этого, степень дискретизации ограждающих конструкций КСФС должна быть увязана с плотностью конечно-элементной сетки области грунта [5].

Гексаэдральный объемный конечный элемент, применяемый для дискретизации грунтового массива, имеет три вектора перемещения $\{u\}$ в узле элемента (рис. 3).

Матричное уравнение движения элементов:

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

описывает его поведение до появления неупругих деформаций.

Нелинейный характер работы грунтового массива приводит к системе нелинейных дифференциальных уравнений работу элементов в упругопластической стадии.

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{P(t)\} + \{F\}, \quad (2)$$

где $\{P(t)\}$ – столбец-вектор обобщенных сил, действующих на элемент;
 $\{F\}$ – столбец-вектор начальных узловых сил, обусловленный начальными напряжениями в элементах при их работе за пределами упругости.

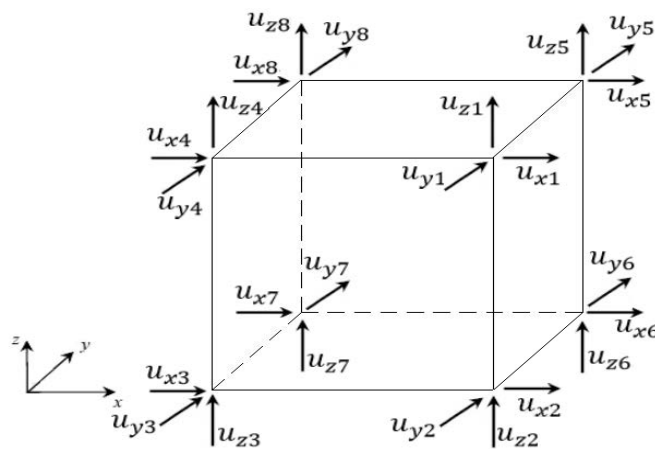


Рисунок 3 – Гексаэдральный конечный элемент перемещения

Figure 3 – Hexahedral finite element of displacement

Матрица масс $[m]$ и матрица жесткости $[k]$ элемента определяются следующими выражениями.

$$[m] = \rho F l \int_0^1 N^T N d\xi \quad (3)$$

$$[k] = [B][D][B]^T V \quad (4)$$

где $[B]$ – матрица деформирования;
 $[D]$ – матрица упругих характеристик материала;
 V – объем элемента.

Для того, чтобы построить матрицу жесткости элемента необходимо выразить перемещения точек внутри элемента $\{u\} = \{u(x, y, z) \ v(x, y, z) \ w(x, y, z)\}$ через перемещения его узлов $\{q\}_i$, другими словами установить зависимость вида

$$\{u\} = [N]\{q\}_i. \quad (5)$$

Здесь $[N]$, так называемая, матрица интерполяционных функций, которая в данном случае будет иметь восемь блоков, по числу узлов

$$[N] = [[N]^{(1)} \dots [N]^{(k)} \dots [N]^{(8)}], \quad (6)$$

каждый из которых равен

$$[N]^{(k)} = E_3 N_k(x, y, z), \quad (7)$$

где E_3 - единичная матрица третьего порядка.

Интерполяционные функции $N_k(x, y, z)$ обычно формулируют не в общей системе координат x, y, z , а в местной, трехмерной нормализованной, имеющей для гексаэдра вид

$$\xi = \frac{x-x_c}{a}; \eta = \frac{y-y_c}{a}; \zeta = \frac{z-z_c}{a} \quad (8)$$

x_c, y_c, z_c - координаты центра тяжести гексаэдра.

В этих координатах интерполяционная функция будет иметь вид

$$N_k(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 + \eta_k \eta)(1 + \xi_k \xi)(1 + \zeta_k \zeta) \quad (9)$$

и представляет собой интерполяционный полином первого порядка. Физический смысл выражения $N_k(\xi, \eta, \zeta)$ заключается в том, что каждая из зависимостей представляет собой отношение объема соответствующего заштрихованному параллелепипеду с вершиной в данной точке к объему всего конечного элемента [6].

Деформации внутри элемента определяются через перемещения его узлов посредством, так называемой, матрицы деформаций $[B]$, содержащей восемь стандартных блоков, которые входят в качестве сомножителей в подынтегральное выражение соотношения:

$$[B] = [[B]^{(1)} \dots [B]^{(k)} \dots [B]^{(8)}], \quad (10)$$

Стандартный блок матрицы деформаций определяется с помощью соотношения:

$$[B]^{(k)} = [\Phi] N_k(x, y, z) \quad (11)$$

где $[\Phi]$ матрица дифференциальных операторов:

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (12)$$

После дифференцирования получим

$$[B] = \frac{1}{8a} \begin{bmatrix} \xi_k(1 + \eta_k \eta)(1 + \zeta_k \zeta) & 0 & 0 \\ 0 & \eta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \zeta_k \zeta) & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \eta_k \eta) \\ \eta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \zeta_k \zeta) & \xi_k(1 + \eta_k \eta)(1 + \zeta_k \zeta) & 0 \\ 0 & \zeta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \eta_k \eta) & \eta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \zeta_k \zeta) \\ \zeta_k(1 + \xi_k \xi)(1 + \eta_k \eta) & 0 & \xi_k(1 + \eta_k \eta)(1 + \zeta_k \zeta) \end{bmatrix}$$

$$[D] = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Матрица вязкости [C] определяется из выражения:

$$[C] = \alpha_1[m] + \alpha_2[k], \tag{13}$$

где: α_1 и α_2 – произвольные коэффициенты пропорциональности.

Конечно-элементная модель конструкций фортификационного сооружения котлованного типа строится на основе пакета типовых конечных элементов. Рамный каркас разбивается на оболочечные конечные элементы, воспринимающие изгибные, продольные, и сдвиговые деформации. Эти конечные элементы наделяются свойствами железобетонных плит, которые могут деформироваться в различных стадиях. При разработке дискретной модели схемы необходимо учитывать, что узлы конечных элементов грунта должны взаимодействовать с соответствующими узлами конечных элементов конструкции, примыкающих к грунту. Степень дискретизации ограждающих конструкций на конечные элементы должна быть увязана с плотностью конечно-элементной области грунта.

Оболочечный конечный элемент [7] характеризуется вектором усилий {f} (рис. 4) и вектором узловых перемещений {u} (рис. 5).

$$\{f\} = \{N_{xx}, N_{xy}, Q_{zx}, M_{xy}, M_{xx}, N_{yy}, N_{xy}, Q_{yz}, M_{xy}, M_{yy}, N_{xx}, N_{xy}, Q_{zx}, M_{xy}, M_{xx}, N_{yy}, N_{xy}, Q_{yz}, M_{xy}, M_{yy}\}^T; \tag{14}$$

$$\{U\} = \{u_1, v_1, w_1, \theta_{xz1}, \theta_{yz1}, u_2, v_2, w_2, \theta_{xz2}, \theta_{yz2}, u_3, v_3, w_3, \theta_{xz3}, \theta_{yz3}, u_4, v_4, w_4, \theta_{xz4}, \theta_{yz4}\}^T \tag{15}$$

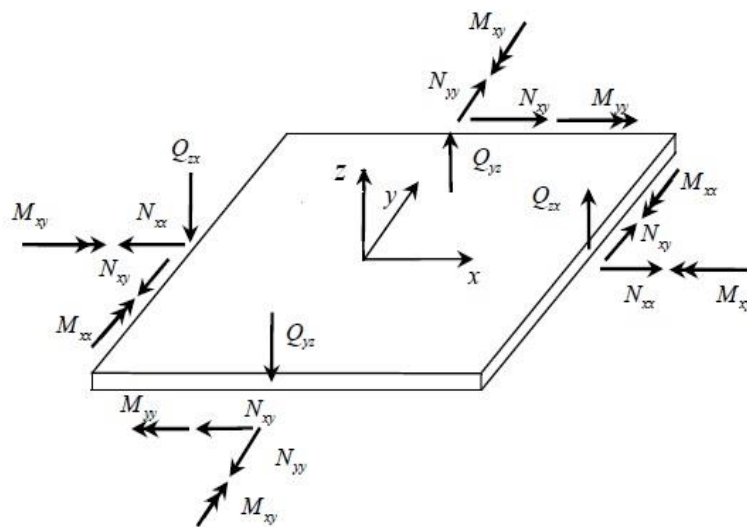


Рисунок 4 – Векторы усилий оболочечного конечного элемента

Figure 4 – Vectors of efforts of the shell finite element

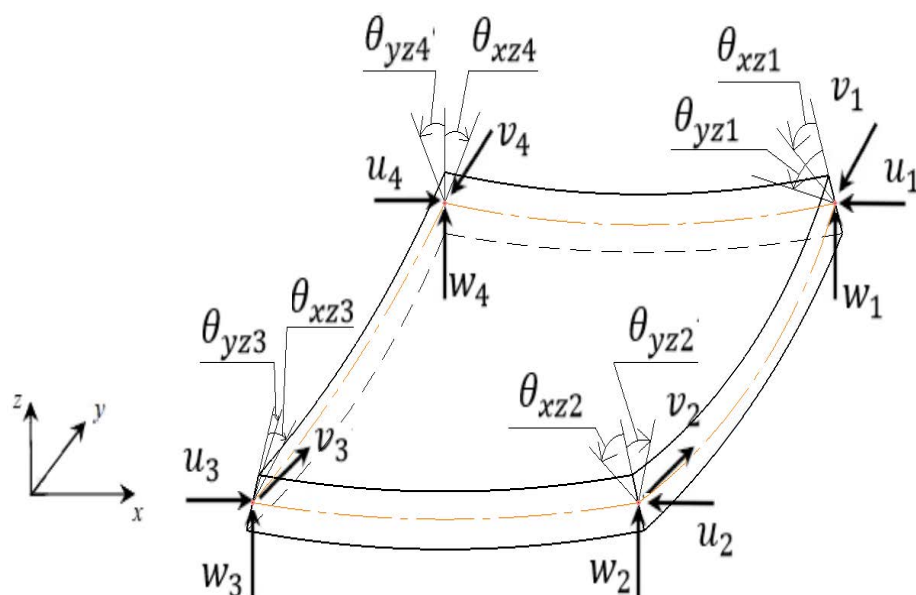


Рисунок 5 – Векторы узловых перемещений оболочечного конечного элемента

Figure 5 – Vectors of nodal displacements of the shell finite element

Точность результатов расчета, получаемых на основе МКЭ, зависит, в первую очередь, от степени и характера дискретизации решаемой области на конечные элементы. Как правило, в численных решениях, наряду с точностью рассматривается вопрос экономии ресурсов ЭВМ, что в конечном итоге приводит к необходимости применения оптимальных дискретных схем, удовлетворяющих по точности и требуемым ресурсам вычислительной технике.

Методика расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва с учетом фактического состояния несущих конструкций, реализована в вычислительной программе MIDAS GTS NX. В основе алгоритма численного решения задачи лежит пошаговое совместное интегрирование разрешающих уравнений, описывающих динамическое поведение грунтового массива и строительных конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений. В целом же методика расчета включает и ряд вспомогательных операций, в том числе связанных с построением расчетной схемы и подготовкой исходной численной исходной схемы и подготовкой численной информации для машинного счета [8].

Основные операции методики следующие:

- проведение обследования строительных конструкций;
- выявление дефектов и повреждений;
- ввод исходных данных, их обработка и предварительные вычисления;
- построение дискретной модели строительных конструкций и грунтового массива;
- формирование матрицы жесткости ансамбля конечных элементов с учетом дефектов и повреждений;
- формирование нагрузки, действующей на расчетную область в соответствии с заданной моделью сейсмозрывного воздействия;
- совместное интегрирование разрешающих уравнений области решения на один шаг с учетом взаимодействия грунта и строительных конструкций КСФС;
- определение НДС грунтового массива на основе уравнений состояния, определяющих упругое и упругопластическое деформирование;

– определение НДС строительных конструкций.

Результатом расчета является напряженно-деформированное состояние несущих конструкций и нескального грунта.

Научная новизна методики в отличие от существующих состоит в том, что позволяет в расчете реконструируемых КСФС учесть фактическое состояние несущих конструкций, что в свою очередь наиболее полно отражает напряженно-деформированное состояние несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений.

Теоретическая значимость заключается в обосновании применения теорий механики континуума, упругости и пластичности и метода конечных элементов и начальных напряжений при расчете несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений на воздействия сейсмозрывных волн ядерного взрыва в процессе проектирования реконструкции КСФС.

Практическая значимость разработанной методики заключается в возможности применения для оценки фактического состояния несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений после воздействия динамических нагрузок.

Достоверность численных решений необходимо сравнить с результатами натурного эксперимента. НИЦ 26ЦНИИ МО РФ в 2004 и 2005 гг. в рамках КНИР «Котлован» [9Ошибка! Источник ссылки не найден.] произведены экспериментальные исследования параметров волновых полей, генерируемых в грунтовых массивах при многократном действии БПОС.

Экспериментальные исследования, позволяющие оценить влияние многократности воздействия на параметры возбуждаемых сейсмозрывных волн (СВВ), реализующихся в преградах и грунтовых массивах, имеют важное значение для оценки действия поражающих факторов обычных средств поражения (ОСП) на конструкции защитных сооружений. Полученные при этом экспериментальные данные необходимы для тестирования численных методик расчета СФС и преград на взрывные нагрузки, а также методик расчета областей разрушения преград при взрывах заглубленных зарядов ВТО в различных средах. Исследуемые волновые поля генерируются в массиве мягкого грунта.

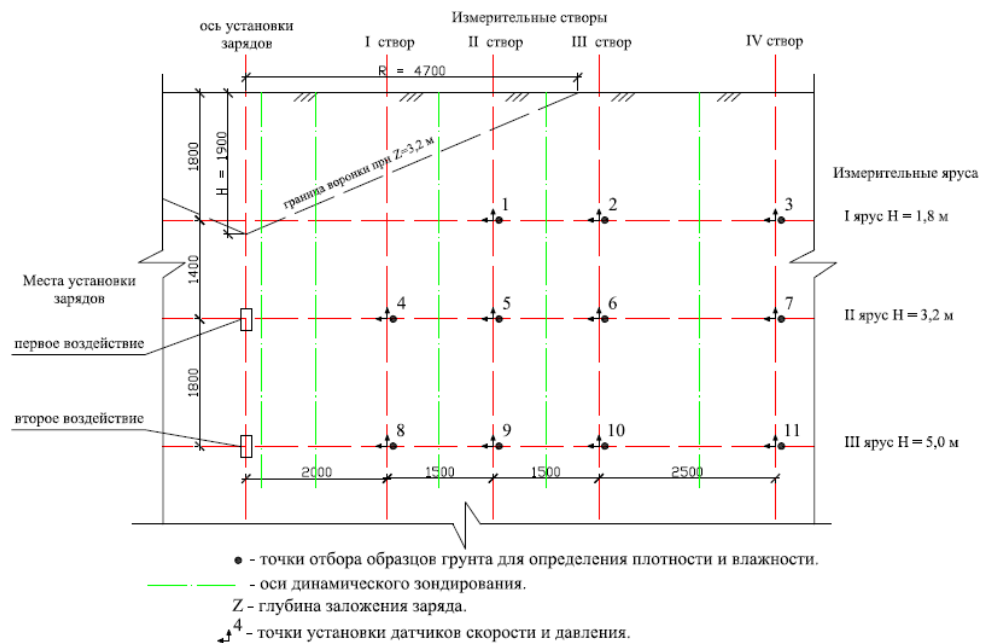


Рисунок 6 – Расчетная схема эксперимента

Figure 6 – Calculation scheme of the experiment

Физико-механические характеристики грунта приведены в таблице (табл. 1).

Таблица 1 – Физико-механические характеристики грунта

Table 1 – Physical and mechanical characteristics of the soil

№ п/п	Наименование характеристики	Единица	Символ	Величина
1.	Модуль деформации	МПа	E	10
2.	Коэффициент Пуассона	-	ν	0,28
3.	Удельный вес	кг/м ³	γ	2000
4.	Сцепление	МПа	C_s	0,02
5.	Угол внутреннего трения	градусы	φ	20

Произведем данный эксперимент согласно разработанной методике в программном комплексе MIDAS GTX NS. Для этого создадим расчетную область и дискретную модель, изображенную на рисунке (рис. 7).

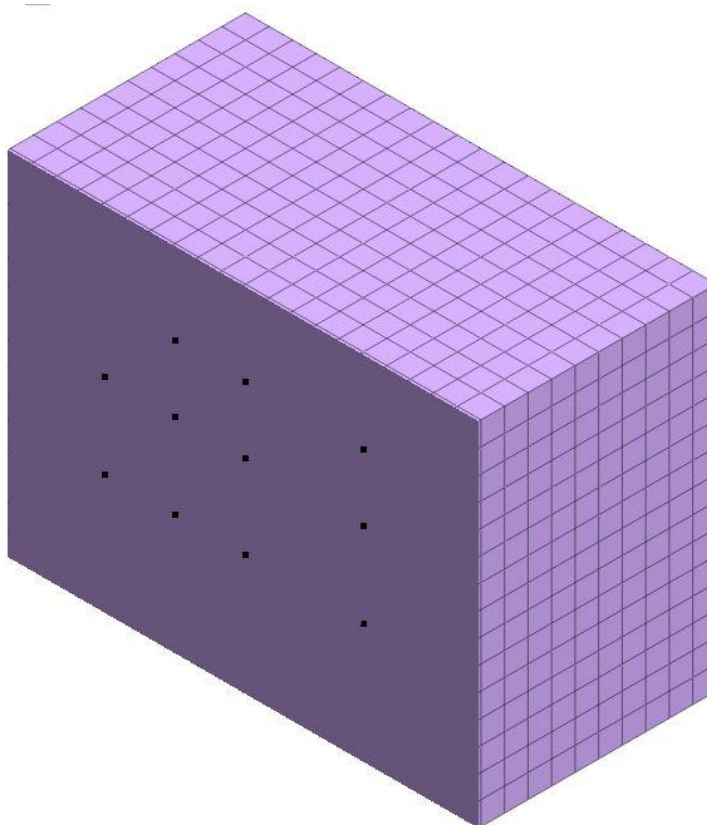


Рисунок 7– Дискретная модель эксперимента

Figure 7 – Discrete model of the experiment

Сравнение результата численного решения с экспериментальными данными по смещениям и скоростям смещений точек приведены на рисунках (рис. 8, 9).

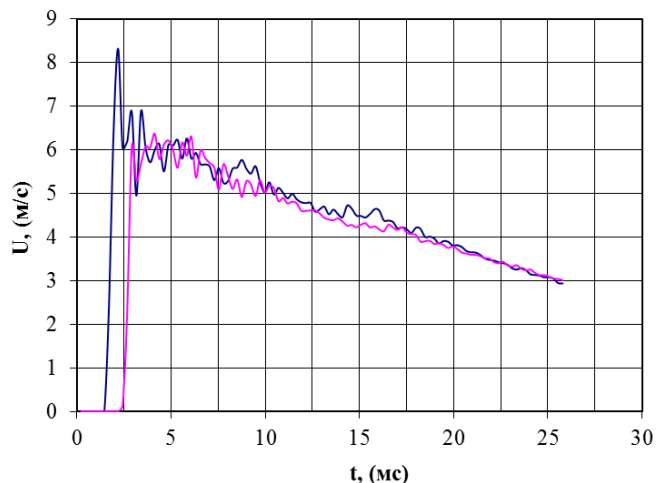


Рисунок 8 – Зависимость горизонтальных скоростей от времени на глубине 5 м

Figure 8 – Dependence of horizontal velocities on time at a depth of 5 m

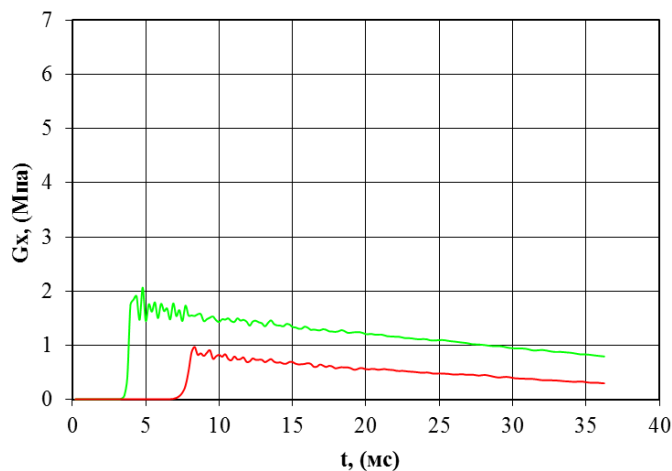


Рисунок 9 – Зависимость давления от времени на глубине 5 м

Figure 9 – Dependence of pressure on time at a depth of 5 m

Анализ приведенных результатов эксперимента и численного решения позволяет сделать следующие выводы:

- закономерности изменения во времени горизонтальных скоростей и давления (рис. 8, 9), полученные экспериментальным путем, хорошо согласуются с численными результатами;
- экспериментальные среднестатистические максимальные относительные значения горизонтальных скоростей и давления и полученные расчетом по предложенной методике лежат в пределах доверительного интервала эксперимента;
- максимальные абсолютные значения горизонтальных скоростей и давления также лежат в пределах доверительного интервала эксперимента и отличаются от его среднестатистических значений не более чем на 5%. Несовпадения абсолютных значений горизонтальных скоростей, представленных на рисунке (рис. 8), составляют 18%.

3. Вывод

Разработанная методика пространственного расчета реконструируемых котлованных специальных фортификационных сооружений в нескальных грунтах на воздействие сейсмозрывных волн ядерного взрыва в отличие от существующих позволяет учесть фактическое состояние несущих конструкций, что в свою очередь наиболее полно отражает напряженно-деформированное состояние несущих конструкций котлованных. Она позволяет выполнить оценку фактического состояния несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений после воздействия динамических нагрузок.

В методике четко обосновывается применение теорий механики континуума, упругости и пластичности и методов конечных элементов и начальных напряжений при расчете несущих конструкций котлованных специальных фортификационных сооружений на воздействия сейсмозрывных волн ядерного взрыва в процессе проектирования реконструкции КСФС.

Список литературы

1. Короленок Л.М., Галушко М.М., Плоцкий П.В. Влияние грунтовых условий на сейсмостойкость специальных подземных сооружений при воздействии землетрясений // *Военный инженер*. 2016. №2. С. 21–24.
2. Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г. Геодинамическая активность литосферы, ее интегральная оценка и связь с сейсмичностью. Современная тектоническая активность Земли и сейсмичность. Докл. 19 Всес. совещ., Москва, янв., 1986. М., 1987. С. 97–108.
3. Бабичев А.И. Методика расчета котлованных фортификационных сооружений прямоугольного профиля при сверхрасчетных воздействиях динамических нагрузок от ядерного взрыва. Ленинград. Инв. № 29740. 1990. 336 с.
4. Ольшанко А.В. Расчет конструкций специальных фортификационных сооружений прямоугольной формы на взрывное воздействие во внутреннем объеме. СПб. Инв. № 31521. 2003. 165 с.
5. Строкова Л.А. Пособие «Динамика грунтов». Издательство Томского политехнического университета. 2018. С.234
6. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. Пер. с англ. М.: Стройиздат. 1982. 447 с.
7. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет конструкций специальных сооружений: Учеб. Пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат. 1990. 208 с.
8. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. Пер. с англ. М.: Стройиздат. 1982. 447 с.
9. КНИР «Котлован» НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ. 2004 год

References

1. Korolenok L.M., Galushko M.M., Plockij P.V. Vliyanie gruntovykh uslovij na sejsmostojkost' special'nykh podzemnykh sooruzhenij pri vozdejstvii zemletyasenij. *Voennyj inzhener*. 2016, no. 2, pp. 21–24. [In Russian]
2. Logachev N.A., Sherman S.I., Levi K.G. Geodinamicheskaya aktivnost' litosfery, ee integral'naya ocenka i svyaz' s sejsmichnost'yu. *Sovremennaya tektonicheskaya aktivnost' Zemli i sejsmichnost'*. Dokl. 19 Vses. soveshch., Moskva, yanv., 1986. M., 1987, pp. 97–108. [In Russian]

3. Babichev A.I. Metodika rascheta kotlovannykh fortifikacionnykh sooruzhenij pryamougol'nogo profilya pri sverkh raschetnykh vozdeystviyakh dinamicheskikh nagruzok ot yadernogo vzryva. Leningrad. Inv. № 29740. 1990, 336 p. [In Russian]
4. Ol'shanko A.V. Raschet konstrukcij special'nykh fortifikacionnykh sooruzhenij pryamougol'noj formy na vzryvnoe vozdeystvie vo vnutrennem ob'eme. SPb. Inv. № 31521. 2003, 165 p. [In Russian]
5. Strokova L.A. Posobie «Dinamika gruntov». Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2018, p. 234. [In Russian]
6. Bate K., Vil'son E. Chislennye metody analiza i metod konechnykh ehlementov. Per. s angl. M.: Strojizdat. 1982, 447 p. [In Russian]
7. Popov N.N., Rastorguev B.S. Raschet konstrukcij special'nykh sooruzhenij: Ucheb. Posobie dlya vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Strojizdat. 1990, 208 p. [In Russian]
8. Bate K., Vil'son E. Chislennye metody analiza i metod konechnykh ehlementov. Per. s angl. M.: Strojizdat. 1982, 447 p. [In Russian]
9. KNIR «Kotlovan» NIC 26 CNII MO RF. 2004 god. [In Russian]

Информация об авторах / Information about the authors

Короленок Леонид Михайлович, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Фортификация и маскировка» Военного института (Инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева.

Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: leonid.korolenok@mail.ru

тел.: +7 921 332-79-91

Leonid M. Korolenok, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Fortification and Camouflage, Military Institute (Engineering and Technical) Military Academy of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulev.

St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: leonid.korolenok@mail.ru

phone: +7 921 332-79-91

Снегирев Алексей Евгеньевич*, главный инженер Центра государственной экспертизы федеральной службы войск национальной гвардии РФ. Москва, Российская Федерация

e-mail: alexeyspbrus@mail.ru

тел.: +7 903 254-27-39

Alexey E. Snegirev*, Chief Engineer of the Center for State Expertise of the Federal Service of the National Guard Troops of the Russian Federation. Moscow, Russian Federation

e-mail: alexeyspbrus@mail.ru

phone: +7 903 254-27-39

Сорокин Никита Васильевич, инженер группы инженерных изысканий Центра государственной экспертизы федеральной службы войск национальной гвардии РФ.

Москва, Российская Федерация

e-mail: sorokita1999nikita@gmail.com

тел.: +7 995 997-61-49

Nikita V. Sorokin, engineer of the engineering survey group of the Center for State Expertise of the Federal Service of the National Guard Troops of the Russian Federation.

Moscow, Russian Federation

e-mail: sorokita1999nikita@gmail.com

phone: +7 995 997-61-49

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author