



СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

DOI 10.21883/2618-9283

EARTHQUAKE ENGINEERING, CONSTRUCTION SAFETY

ISSN 2618-9283

06 2022

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
www.seismotconstruction.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) (до 16 октября 2022, на перерегистрации в ВАК);
- 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки) (до 16 октября 2022, на перерегистрации в ВАК);

1.6.1 – Общая и региональная геология, Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки) (до 16 октября 2022, на перерегистрации в ВАК);

1.6.7 – Инженерная геология, мерзотоведение 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 20.12.2022 г. под номером 2186.

С 24 мая 2021 года журнал входит в **Russian Science Citation Index (RSCI)**

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 № 1077-72754 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.ru>).

Председатель – А.А. Бубис.

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

Адрес издательства и редакции: 119428, город Москва, ул. 2-я Институтская, дом 6, строение 37.

Телефон: 8-499-174-70-82, 8-499-174-70-65. **E-mail:** info@raee.ru

Периодичность: 6 раз в год

Даты выхода в свет: февраль, март, 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) (on re-registration in the Supreme Attestation Commission (VAK));
- 2.4.5 – Nuclear power plants, fuel cycle, radiation safety (technical sciences) (on re-registration in the Supreme Attestation Commission (VAK));
- 1.6.1 – General and regional geology, tectonics and geodynamics science (geological and mineralogical sciences) (on re-registration in the Supreme Attestation Commission (VAK));
- 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 dissertation 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 20.12.2022 listed under the 2186 position.

Since May 24, 2021, it is included in the Russian Science Citation Index (RSCI).

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 no ES 77-7275 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 man-made 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 Institutskaya, house 6, building 37. Phone: 8-499-171-05-22; 8-499-171-70-65. 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

Бублик А.А. (Москва, Российская Федерация)

Ответственный секретарь редколлегии

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

Редакционная коллегия

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

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

Белая Г.А., доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Вада Акира, доктор, профессор (Токио, Япония)

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

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

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

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

Клементе Пасло, доктор, профессор (Рим, Италия)

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

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

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

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

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

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

Семсенов 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)

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

Чименцаро Жан-Пабло, 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)

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

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

Vada 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)

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

Il'ichev V.A., DSc, Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Science (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 (Kyiv, Ukraine)

Noroozinejad Parsangi 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

№ 6 – 2022

Теоретические и экспериментальные исследования

Минасян А.А., Шуклин М.Л., Ставицкий И.Р.

Спектры энергии и мощности как критерии интенсивности техногенных, динамических и сейсмических воздействий 8

Аббас З.К., Шилдкамп М., Салиев А.Д.

Определение сейсмических сил в зданиях со стенами из природного камня в Федеративной Демократической Республике Непал, Российской Федерации и Республике Таджикистан 13

Сангинов А.М.

Исследование надежности железобетонных резервуаров для хранения чистой воды в условиях высокой сейсмичности региона 46

Сейсмостойкость и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Босхий А.Е., Далин В.В., Тарасов В.А.

Выбор параметров пружинно-демпферной изоляции здания турбины с виброизолированным фундаментом турбоагрегата в составе 55

Градостроительные проблемы сейсмической безопасности

Нобиев Р.А., Курдюм А.Ю., Башмачников В.Д.

Определение сейсмической безопасности зданий и сооружений в Иранском Поволжье и на Северном Каспии 71

Этого на обложке номера из открытых источников.

CONTENTS

№ 6 – 2022

Theoretical and experimental studies

A.A. Minasian, M.L. Shumilina, L.R. Stavnitsker

Power and energy spectra as criteria for the intensity of technogenic, dynamic and seismic impacts 8

Z.I. Abaev, M. Schildknecht, A.D. Valiev

Base shear seismic demand comparison for buildings with natural stone walls in Nepal, Russia and Tajikistan 18

A.M. Sanginov

Investigation of the reliability of reinforced concrete tanks for storing clean water in conditions of high seismicity of region 46

Seismic protection and seismic isolation of buildings and structures

A.E. Bahskiy, V.V. Lalin, V.A. Tarasov

Selection the parameters of spring-damper insulation of the turbine building with a vibration-isolated turbine foundation inside 55

Urban planning problems of seismic safety

R.A. Nabiev, A.Ya. Kirdyuk, V.D. Gromachnikov

Determination of seismic safety of buildings and structures in the Lower Volga region and the Northern Caspian 71

Photo on the cover of the issue – from the open sources.

12+

ISSN 2618-9283

(c) PACC, 2022

УДК 624.042.8:69.0

DOI [10.37153/2618-9283-2022-6-8-17](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-8-17)

Theoretical and experimental studies

Спектры энергии и мощности как критерии интенсивности техногенных, динамических и сейсмических воздействий

Минасян А.А.¹, Шуклина М.Л.², Ставницер Л.Р.³

^{1,2,3} АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

Аннотация: Рассматриваются спектры мощности и энергии как дополнительные критерии интенсивности техногенных, динамических и сейсмических воздействий. В процессе анализа последствий ряда разрушительных землетрясений было выявлено, что интенсивность сейсмических воздействий, кроме ускорения грунта, непосредственно зависит от спектральных характеристик мощностей и энергии внешних воздействий. При расчете и проектировании динамически живучих систем необходимо кроме спектра ускорения учитывать спектры мощностей и энергии.

Ключевые слова: сейсмические воздействия, ускорение грунта, энергия, землетрясение, спектр мощности

Для цитирования: Минасян А.А., Шуклина М.Л., Ставницер Л.Р. Спектры энергии и мощности как критерии интенсивности техногенных, динамических и сейсмических воздействий // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 6. С. 8–17. DOI: [10.37153/2618-9283-2022-6-8-17](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-8-17)

Theoretical and experimental studies

Power and energy spectra as criteria for the intensity of technogenic, dynamic and seismic impacts

Minasian A.A.¹, Shuklina M.L.², Stavnitser L.R.³

^{1,2,3} JSC RCC. Moscow, Russian Federation

Abstract: Power and energy spectra are considered as additional criteria for the intensity of technogenic, dynamic and seismic impacts. Analyzing the consequences of a number of destructive earthquakes, it was revealed that the intensity of seismic impacts, in addition to ground acceleration, directly depends on the spectral characteristics of the energy and power of external influences. When calculating the design of dynamically tenacious systems, it is necessary to take into account the power and energy spectra in addition to the acceleration spectrum.

Keywords: seismic impacts, ground acceleration, energy, earthquake, power spectra

@ Минасян А.А., Шуклина М.Л., Ставницер Л.Р., 2022

For citation: Minasian A. M., Shuklina M. I., Stavnitser L. R. Power and energy spectra as criteria for the intensity of technogenic, dynamic and seismic impacts. *Earthquake engineering. Construction safety*. 2022, no. 6, pp. 8–17 (In Russian)
DOI: [10.26182/2022-6-8-17](https://doi.org/10.26182/2022-6-8-17)

УСКОРЕНИЯ КАК КРИТЕРИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Методы расчета строительных конструкций основаны на динамических принципах определения сейсмических воздействий. Исходными в расчете являются инерционные силы. Последние же связаны с ускорениями грунта, на котором расположено сооружение. Таким образом, ускорения имеют важную характеристику, которую сейсмологи давно начали определять. Так, например, максимальные ускорения при землетрясении в Японии в 1923 г. были установлены расчетным путем и по записям приборов. В эпицентральной области они получились равными 200-400 см/с², что по данным сейсмолога Б. Гуденберга (США), согласуется с эффектом 10-11-балльного землетрясения. За меру интенсивности сейсмических воздействий принято считать балльность – величину ускорения колебания на свободной поверхности грунта. Это обусловлено тем, что сейсмическая сила непосредственно зависит от ускорения основания [1-4].

В [4] различным баллам соответствовали следующие максимальные ускорения $\ddot{y}_0$ поверхности Земли (табл. 1):

Таблица 1

Table 1

Баллы	4	6	8	10	12
$\ddot{y}_0/g$	0,001	0,003	0,025	0,1	0,5-1

где g – ускорение силы тяжести.

Японским сейсмологом К. Сюэхиро [5] была опубликована книга, в которой он на основании анализа последствий землетрясения в Токио в 1923 г. подсчитал разумным рассчитывать сооружения на ускорения 0,1 – 0,15 g .

В работе проф. С.В. Полякова подробно анализируются нормируемые ускорения грунта, начиная с 1932 до 1973 г. [6].

В 1957 г. в СССР был изменен метод расчета сейсмических нагрузок. В нормах

СН 8–57 для зданий с жесткой конструктивной схемой были существенно повышены сейсмические нагрузки, что вызвало ряд возражений. Авторы возражений настаивали на снижении нагрузок для жестких зданий по сравнению с нагрузками, принятыми в

СН 8–57, примерно в 1,5 раза. В то же время в работах Института физики Земли указывалось на значительное снижение принятых в действовавшей с 1932 по 1952 г. шкалы СССР ВКС-4537 ускорений грунта $\ddot{y}_{01}$, и были опубликованы значения ускорений $\ddot{y}_0$ полученные по инструментальным данным.

В 1973 г. комиссией, работавшей под председательством акад. А.Г. Низарова по составлению нового варианта шкалы, было предложено дальнейшее увеличение нормируемых ускорений грунта $\ddot{y}_{0н}$ (таблица 2).

Таблица 2

Table 2

Балл	$\ddot{y}_0$, см/с ²	$\ddot{y}_0$, см/с ²	$\ddot{y}_{0н}$, см/с ²
7	0,01–0,025	0,05–0,1	0,05–0,125
8	0,025–0,05	0,1–0,2	0,125–0,25
9	0,05–0,1	0,2–0,4	0,25–0,5

С 1952 по 1973 г. ускорения грунта, нормируемые шкалой, были скорректированы несколько раз. Вместе с тем, из-за столь большой погрешности, допущенной в оценке ускорений, можно было ожидать массовых обрушений сооружений при землетрясениях. Анализ последствий разрушительных землетрясений в Чили (2010 г.), на Гаити (2010 г.) в Новой Зеландии (2011 г.) и др. показывает, что во многих случаях в результате сейсмических воздействий с максимальным ускорением разрушения зданий и сооружений существенно меньше. К такому же выводу пришли специалисты при анализе последствий разрушительных землетрясений. Очевидно, что весьма важной причиной является и то, что в основу шкалы положено максимальное ускорение в пределах всей записи, характерное обычно только для одного цикла, во многих случаях не определяющее работу, энергию и мощность сейсмических воздействий.

Здания и сооружения, спроектированные и рассчитанные по нормам на сейсмические воздействия, могут выдержать лишь некоторую долю инерционной нагрузки (например, по СП для 8-балльной зоны эта доля составляет 25–40%). При этом в зданиях могут развиваться неупругие деформации, трещины, повреждения некоторых внутренних связей. Однако при землетрясениях здание должно выдерживать мощность многократно повторяющихся сейсмических воздействий, сопровождающихся толчками и ударами разных направлений [7–9].

На рис. 1 показано разрушение зданий при землетрясении в Индонезии.



Рисунок 1 – Разрушение зданий при землетрясении в Индонезии (2021 г.)

Figure 1 – Destruction of buildings in the earthquake in Indonesia (2021)

КРИТЕРИИ ПО СПЕКТРУ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ

Рассмотрим возможность применения спектральных параметров мощности в качестве меры интенсивности сейсмических воздействий.

Рассмотрим колебания сооружения, которое моделируем как систему с n -й степенью свободы.

Дифференциальное уравнение движения имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 Q(\tau)}{d\tau^2} + \omega_k^2 \exp(i\alpha) Q(\tau) = -\sigma_k \frac{d^2 Q_0(\tau)}{d\tau^2} \quad (1)$$

Здесь $Q(\tau)$ – обобщённый вектор смещения; ω_k – частота колебаний k -ой формы; σ_k – мера рассеяния энергии (затухания); $Q_0(\tau)$ – характеристика движения почвы:

$$\delta_{\text{ЛО}} = \frac{\int_0^T \phi_k(x) M(x) dx + \sum_{i=1}^N \phi_{ik} M_i}{\int_0^T \phi_k(x) M x dx + \sum_{i=1}^N \phi_{ik}^2 M_i}$$

где M_i – инерционная характеристика; $\phi_k(x)$ – характеристика собственной функции.

Для простоты мы рассматриваем сейсмические воздействия на систему с единичным весом:

$$Q(\tau) = -\delta(2\pi)^{-1} \int_0^{\tau} Q_0(\tau_-) \exp\left[-\frac{\alpha}{2} 2\pi T^{-1}(\tau - \tau_-)\right] \sin 2\pi T^{-1}(\tau - \tau_-) d\tau_-$$

где $T = 2\pi\Omega^{-1}$

и $\Omega = 2\pi(\omega^2 - \alpha^2/4)^{-1/2}$.

Если система имеет лишь один сосредоточенный груз ($\delta=1$), тогда получаем:

$$Q(\tau) = -\delta(2\pi)^{-1} T \int_0^{\tau} Q_0(\tau_-) \exp\left[-\frac{\alpha}{2} 2\pi T^{-1}(\tau - \tau_-)\right] \sin 2\pi T^{-1}(\tau - \tau_-) d\tau_- \quad (2)$$

Обозначим спектр скоростей как

$$S_v(T, \alpha) = \int_0^{\tau} Q_0(\tau_-) \exp\left[-\frac{\alpha}{2} 2\pi T^{-1}(\tau - \tau_-)\right] \sin 2\pi T^{-1}(\tau - \tau_-) d\tau_- / \max \quad (3)$$

Затем определим:

- спектр смещений $S_q(T, \alpha) = |Q(\tau)| \max$, запишем его следующим образом: (4)

$$S_q(T, \alpha) = (2\pi)^{-1} T S_v(T, \alpha) \quad (5)$$

Спектр ускорений определяется:

$$S_w(T, \alpha) = 2\pi T^{-1} S_v(T, \alpha) = (2\pi T^{-1})^2 S_q(T, \alpha) \quad (6)$$

Сейсмическая сила будет:

$$S_s(T, \alpha) = g^{-1} S_w(T, \alpha) = g^{-1} 2\pi T^{-1} S_v(T, \alpha) = g^{-1} (2\pi T^{-1})^2 S_q(T, \alpha) \quad (7)$$

$S_m(T, \alpha)$ – размерность, сила, масса единицы.

Выразим спектр мощности сейсмического воздействия следующей зависимостью:

$$S_m(T, \alpha) = g^{-1} \left(\frac{1}{2\pi T} \right) \left\{ \int_0^{\frac{\tau}{2\pi T}} Q_0(\tau_-) \exp \left[-\frac{\alpha}{2\pi T} (1 - \tau_-) \right] d\tau_- \right\}^2 \quad (8)$$

По спектру смещений $S_m(T, \alpha)$ мощности примет вид:

$$S_m(T, \alpha) = g^{-1} (2\pi T^{-1})^3 S_Q^2(T, \alpha) \quad (9)$$

А по спектру ускорения:

$$S_y(T, \alpha) = (2\pi)^{-1} S_m(T, \alpha) \quad (10)$$

На рис. 2 приведены технические решения по обеспечению живучести безригельных железобетонных зданий.

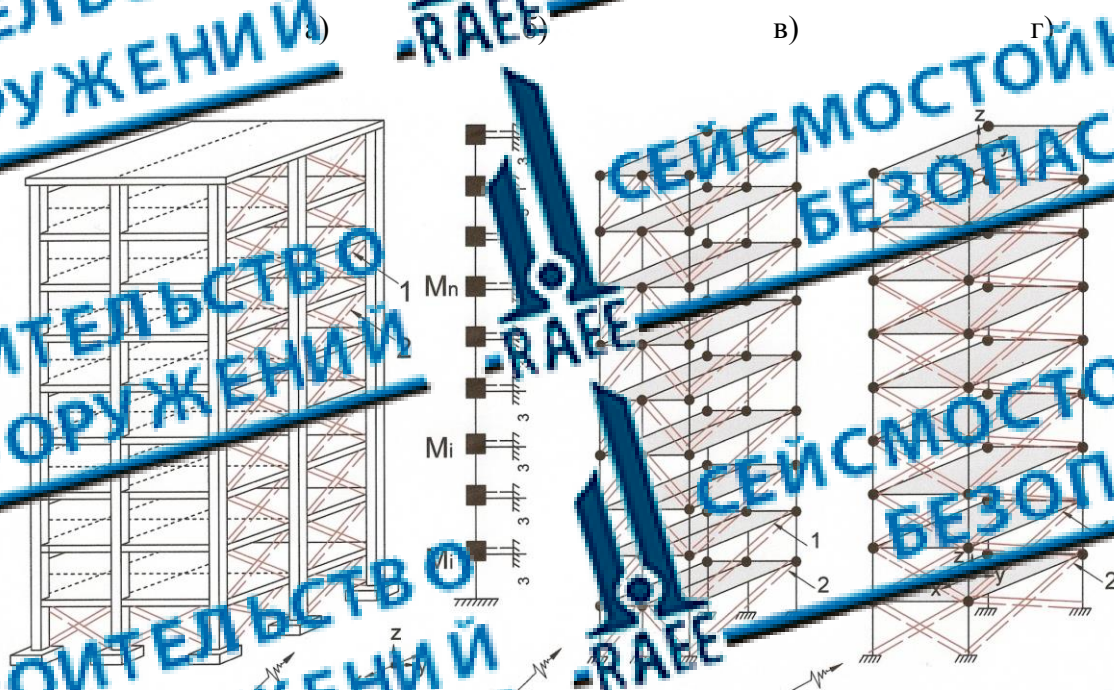


Рисунок 2 – Технические решения комбинированных живучих систем безригельных зданий

1 – упругопластические элементы; 2 – хрупко-разрушающиеся элементы;
а – общий вид безригельного здания; б – расчетная схема с сосредоточенными массами на уровне перекрытий; в – расчетные схемы с применением перекрытий типа жестких дисков и треугольных связей в поперечном направлении; г – расчетные схемы с применением перекрытий типа жестких дисков и крестообразных связей в поперечном направлении.

Figure 2 – The technical solution of the combined tenacious systems of beamless buildings.

1 – elastic-plastic elements; 2 - brittle-dissipating elements;
а – a general view of a beamless building; б – a design scheme with concentrated masses at the floor level;
с – design schemes using hard disk type overlaps and triangular connections in the transverse direction;
д – design schemes using hard disk type overlaps and cross-shaped connections in the transverse direction.

Обычно в инженерной практике интенсивность землетрясений оценивается характеристиками смещения, скорости и ускорения. С использованием 53 акселерограмм сильнейших землетрясений мира, были проанализированы их разрушительные способности в зависимости от максимальных параметров колебаний грунта, кинематических спектров, а также спектров мощности и энергии сейсмических воздействий. Обнаружено, что массовые разрушения зданий и сооружений обусловлены спектральными характеристиками мощности и энергии, которые для землетрясений в Скопье 1976 г., Мехико 1986 г., Сан-Франциско-Эль-Центро 1940 г., Спитаке 1988 г., в Турции (два) 1999 г., имеют максимальные величины, большие, чем для других землетрясений с равнозначными кинематическими параметрами (например, землетрясений Паркфилда, Калифорнийского и др.).

Таблица 3

Table 3

Безразмерные максимальные величины спектра	Спитак Гуасани	Эль-Центро	Паркфилд
работы	6,5	8,8	5,7
мощности	0,81	1,25	0,56
ускорения	0,7	0,53	0,78

В таблице 3 приведен пример анализа спектральных составов землетрясений в Спитаке, Эль-Центро и Паркфилде. Во время землетрясения в Паркфилде параметры максимального ускорения грунта и кинематических спектров были на 50% больше, чем те же параметры землетрясений в Эль-Центро 1940 г. и Спитаке в 1988 г. Однако в Эль-Центро и Спитаке многие здания были повреждены и разрушены значительно больше, чем в Паркфилде. С учетом данных (таблица 3) настоящей работы можно сделать вывод, что спектры мощности и энергии в Эль-Центро и Спитаке были интенсивнее, чем в Паркфилде. Этим и объясняется большее разрушительное воздействие землетрясения Эль-Центро 1940 г.

Живучесть безригельных каркасных зданий может быть обеспечена комбинационным программными элементами, часть из которых может хрупко скачкообразно разрушаться, а другая – пластически деформироваться. Пороги разрушения этих элементов значительно ниже, чем безригельных каркасных зданий, что обеспечивает использование полной несущей способности комбинационных элементов (связей, пучков, прядей, вантов). Данные элементы могут устанавливаться между жесткими дисками перекрытий и колоннами – также крестообразно между несущими колоннами (рис. 2).

Значительный вклад в развитие сейсмозащитных систем в СССР и России внесли профессор Я.М. Айзенберг и его ученики.

Анализ проведенных исследований параметров 3-х землетрясений показывает, что интенсивность, работа (энергия) и разрушительная способность сейсмических воздействий адекватно характеризуют спектры мощности и энергии. Таким образом, при проектировании динамически живучих систем необходимо учитывать спектральный состав мощности и энергии внешнего воздействия.

На рис. 3 представлены спектры энергии обычной системы (а) и живучей системы (б).



Рисунок 3 – Спектры энергетических характеристик а) ОС – обычная система, б) ЖС – живучая система

Figure 3 – Spectra of energy characteristics а) OS – a conventional system, б) OS a tenacious system

Спектры энергии живучих систем значительно ниже спектров обычной системы, что дает возможность надежно эксплуатировать здания и сооружения при экстремальных техногенных, динамических и сейсмических воздействиях.

На рис. 4 приведен спектры ускорения при сейсмических воздействиях в г. Акапулько, 1962 г., при затухании 1%, 2% и 5% от критического.

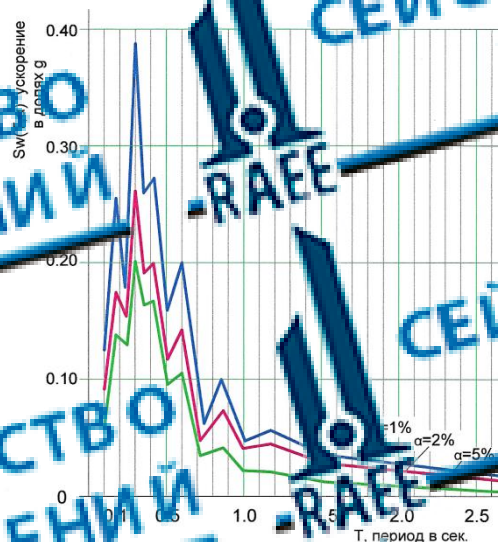


Рисунок 4 – Спектры ускорения при сейсмических воздействиях в г. Акапулько, 1962 г.

Figure 4 – Acceleration spectra under seismic impacts in Acapulco, 1962

На рис. 5 приведены спектры ускорения и энергии при сейсмических воздействиях, г. Акапулько, 1962 г.

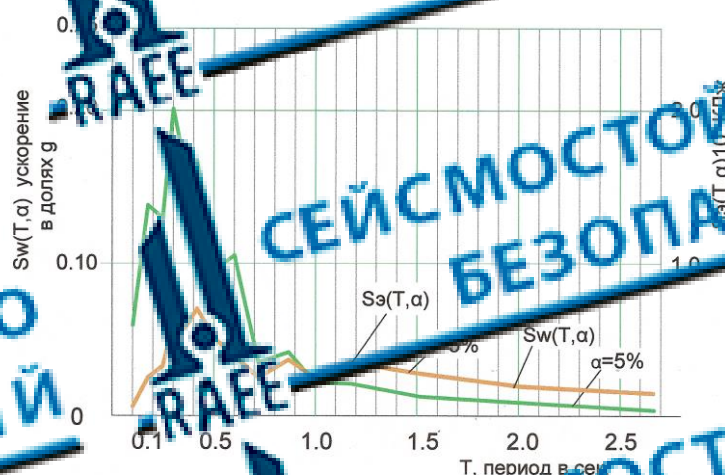


Рисунок 5 – Спектры ускорения и энергии при сейсмических воздействиях, г. Акапулько, 1962 г., затухание 5% от критического

Figure 5 – Acceleration and energy spectra under seismic impacts, Acapulco, 1962, attenuation of 5% of the critical

На рис. 6 приведены спектры ускорения при сейсмических воздействиях в Мехико, 1964 г. при затухании 1%, 2%, 5%.



Рисунок 6 – Спектры ускорения при сейсмических воздействиях в Мехико, 1964 г.

Figure 6 – Acceleration spectra under seismic impacts in Mexico City, 1964

На рис. 7 приведены спектры ускорения и энергии при сейсмических воздействиях в Мехико, 1964 г. затухание 5%.

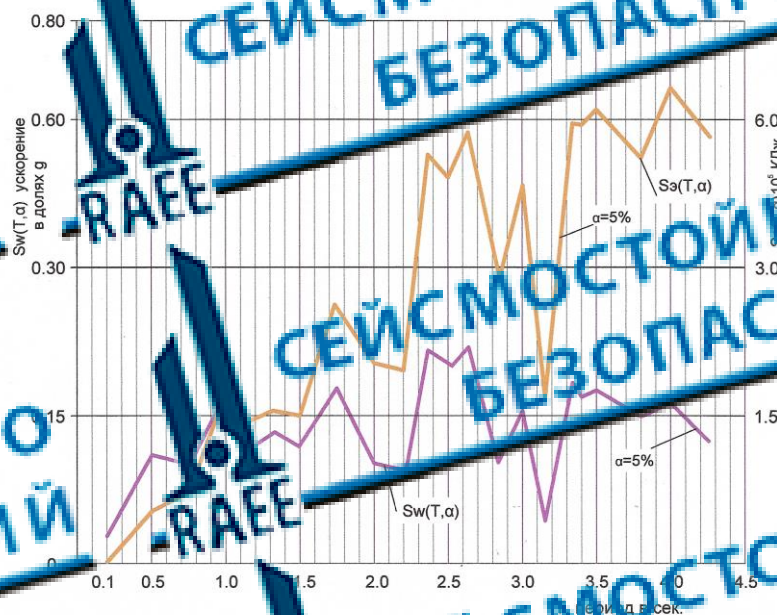


Рисунок 7 – Спектры ускорения и энергии при сейсмических воздействиях в Мехико, 1964

Figure 7 – Acceleration and energy spectra under seismic impacts in Mexico City, 1964

Анализ результатов исследования показывает, что интенсивность и разрушительная способность аварийных нагрузок существенно с кинематическими параметрами определяют спектры мощности энергии техногенных, динамических и сейсмических воздействий.

ВЫВОДЫ

Интенсивность техногенных, динамических и сейсмических воздействий может быть охарактеризована кинематическими параметрами колебаний грунта и спектрами мощности и энергии.

Рекомендуется при расчете и проектировании живучих систем (особенно ответственных сооружений) учитывать параметры и спектральные характеристики мощности и энергии, как более адекватные критерии оценки внешних воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минасян А.В. Комплексное резервирование спектральной живучести уникальных сооружений при чрезвычайных динамических, сейсмических и техногенных воздействиях // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2011. № 3–4. С. 157–171.
2. Айзенберг Я.И., Минасян А.В., Смирнов В.Ю., Минасян А.М. Оценка интенсивности сейсмических воздействий с учетом грунтовых условий на Ленинканском плато Армении // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2000. № 4. С. 15–17.
3. Назаров А.Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил. Гривин: Изд. АН АрмССР. 1959. 314 с.
4. Гусснерг Б., Рихтер К. Сейсмичность Земли. Пер. с нем. М.: ИЛ. 1948. 18 с.
5. Сюэхио К. Инженерная сейсмология. Герс англ. М.: Экономическая жизнь. 1925. 137 с.
6. Поляков С.В. Последствия сильных землетрясений. Изд. Стройиздат. 1978. 310 с.
7. Ганиев Р.Ф., Конеченко Е.С. Колебания твердых тел. М.: Наука. 1976. 431 с.

8. Современное состояние теории сейсмостойкости и сейсмостойкие сооружения. Материалы IV международной конференции по сейсмостойкому строительству. М.: Стройиздат. 1973. 280 p. [In Russian]
9. Аизенберг Я.М., Смирнов В.И., Минасян А.В. Неупругие демпфирующие элементы связи для сейсмозащиты безригельных каркасов // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2001. № 2. С. 38-39. [In Russian]

REFERENCES

1. Minasyan A.V. Kompleksnye rezervirovaniye spektral'noj zhiyuchesi i unikal'nykh sooruzhenij pri chrezvychajnykh dinamicheskikh, seismicheskikh i tekhnogennykh vozdeystviyakh. *Vestnik NIC «Stroitel'stvo»*. 2011, no. 14, no. 157–171. [In Russian]
2. Eizenberg J.M., Minasyan A.V., Smirnov V.I., Avetisyan A.M. Otsenka intensivnosti seismicheskikh vozdeystvij s uchetom granitovykh uslovij na Leninakanskom plato Armenii. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost sooruzhenij*. 2000, no.4, 15–17 p. [In Russian]
3. Nazarov A.G. Metod inzhenernogo analiza seismicheskikh sil. Yerevan, Izd. AN Arm. SSR. 1959. 314 p. [In Russian]
4. Gutenberg B., Rikhter K. Sejsmichnost' Zemli. Per. s angl. M.: IL. 1948. 13 p. [In Russian]
5. Syuehekhiko K. Inzhenernaya sejsmologiya. Per. s angl. M.: Enkhnomiceskaya shizn'. 1935. 137 p. [In Russian]
6. Polyakov S.V. Posledsviya sil'nykh zemetrasenij. M.: Stroizdat. 1978. 310 p. [In Russian]
7. Gariyev R.F., Kononenko V.O. Polezarnaya tsvetaykh tel. M.: «Nauka». 1976. 431 p. [In Russian]
8. Sovremennoe sostoyaniye teorii sejsmostojkosti i sejsmostojkie sooruzheniya. Materialy IV mezhnatsionalnoy konferentsii po sejsmostojkemu stroitel'stvu. M.: Stroizdat. 1973. 280 p. [In Russian]
9. Eizenberg J.M., Smirnov V.I., Minasyan A.V. Neuprugie dempfiruyushchie elementy-svazi dlya sejsmozashchity bezrigel'nykh karakasov. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2001, no.2, 38–39 p. [In Russian]

Данные об авторах / Information about authors

Минасян Арман Арамаисович, кандидат технических наук, заведующий сектором железобетонных конструкций лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИИ «Строительство» Москва, Российская Федерация. 1747210@mail.ru

Arman A. Minasyan, Cand. Sci. (Engineering), head of the Reinforced concrete structures sector of the Laboratory of brick, block and panel buildings of SNIIISK named after V.A. Kucherenko JSC RCC. Moscow, Russian Federation. 1747210@mail.ru

Шуклина Марина Львовна, инженер лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИИ «Строительство» Москва, Российская Федерация

Marina I. Shuklina, engineer of the Laboratory of brick, block and panel buildings of SNIIISK named after V.A. Kucherenko JSC RCC. Moscow, Russian Federation

Ставницер Леонид Рувимович, доктор технических наук, профессор, главный специалист НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИИ «Строительство» Москва, Российская Федерация

Leonid R. Stavnitser, Dr. Sci. (Engineering), professor, chief specialist of the NIIOSP named after N.M. Gersevanov of JSC RCC. Moscow, Russian Federation

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9283-2022-18-45](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-18-45)**Теоретические и экспериментальные исследования**

Определение сейсмических сил в зданиях со стенами из природного камня в Федеративной Демократической Республике Непал, Российской Федерации и Республике Таджикистан

Абаев Заурбек Каиболатович¹, Шилдкамп Мартин², Валиев Азамат Джониевич¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)» (ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»). Владикавказ, Российская Федерация

² Некоммерческая организация «Smart Shelter Research» (SSR). Алфен-ан-де-Гейн, Нидерланды

Аннотация. Введение. Действующие нормы Российской Федерации запрещают возведение зданий из природного камня в сейсмических районах. Для восстановления и реконструкции исторических зданий, сооружений и объектов культурного наследия, расположенных в сейсмоопасных регионах, необходимо, в первую очередь, определить сейсмические воздействия на данные сооружения. Примеры определения сейсмической силы в зданиях сооружения с расчетными параметрами для зданий со стенами из тяжелого природного камня в литературе отсутствуют.

Материалы и методы. Проведены расчеты и анализ сейсмических требований для двух объектов исследования: здания дома и школы со стенами из природного камня, которые обычно строятся в Непале. Проведено детальное сравнение нормативных документов трех стран: Федеративной Демократической Республики (ФДР) Непал, Российской Федерации и Республики Таджикистан (РТ).

Результаты. Представлено подробное сравнение формул для определения сейсмической силы в основании сооружения и распределения сейсмических сил; представлены сравнения плотностей материалов, сейсмических весов, сейсмического расщепления, собственных периодов колебаний, спектров отклика, коэффициентов ответственности и комбинаций сейсмических нагрузок. Наблюдаются большие различия между подходами и коэффициентами. Далее, используя метод эквивалентной поперечной силы (*ELF*) и упрощенный спектральный метод (*S Modal*), рассчитываются сейсмические силы для расчетного первого ускорения грунта $0,2g$, а также рассматривается влияние различных вариантов критической комбинации нагрузок на продольные и поперечные силы и моменты. Особое внимание уделяется возможным разночтениям и противоречиям отдельных положений нормативных документов РФ и РТ. В связи с чем в настоящем исследовании также предложены определения метода двойного (МДП) и единичного приложения (МЕП) коэффициентов сочетаний.

Выводы. В целом можно заметить, что системы «тяжелая стена – легкое перекрытие» ведут себя при сейсмическом воздействии иначе, чем большинство других несущих систем. Учитывая наблюдения, сделанные в данной работе, применимость традиционных методов *ELF* и *S Modal* для зданий из тяжелой кладки вызывает некоторые сомнения. Однако рассмотренные нормы не предусматривают использование модифицированных подходов, учитывающих эти различия. В завершении работы содержится призыв к международному сотрудничеству в рамках исследовательского проекта *SMARTnet*. Настоящая работа также призывает инженерные и академические сообщества РФ и стран СНГ начать конструктивную дискуссию о необходимости корректировки и уточнения некоторых противоречивых положений нормативной документации, а также предложить возможные пути ее модернизации.

@ З.К. Абаев, М. Шилдкамп, А.Д. Галиев, 2022

Ключевые слова: кладка из природного камня, параметры сейсмических требований, сейсмические нормы, сейсмическая сила в основании сооружения, сейсмический вес, комбинации нагрузок, максимальное ускорение грунта

Для цитирования: Абаев З.К., Шилдкэмп М., Валиев А.Д. Определение сейсмических сил в зданиях со стенами из природного камня в Федеративной Демократической Республике Непал, Российской Федерации и Республике Таджикистан // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 6. С. 18–45.

DOI: [10.37235/2618-9283-2022-6-18-45](https://doi.org/10.37235/2618-9283-2022-6-18-45)

Theoretical and experimental studies

Base shear seismic demand comparison for buildings with natural stone walls in Nepal, Russia and Tajikistan

Zaurbek Abaev¹, Martin Schildkamp², Azamat Valiev¹

¹North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), NCIMM (STU), Vladikavkaz, Russian Federation

²Non-profit organization «Smart Shelter Research» (SSR), Alphen aan den Rijn, Netherlands

Abstract. Introduction: The current norms for construction in seismic areas in the Russian Federation prohibit the construction of buildings with natural stone walls, but for the restoration and reconstruction of historic buildings located in earthquake-prone regions, seismic demand of such structures should be determined. Full base shear seismic demand analyses with calculated examples for heavy stone masonry buildings are not present in the literature.

Materials and methods: To address this shortcoming, analyses and calculations are performed on nominally reinforced natural stone walls house and school designs, as typically built in Nepal. A detailed comparison of the seismic codes of the three countries Nepal, Russia and Tajikistan was carried out.

Results: This paper compares the base shear formulas and the inertia forces distributions of these codes, as well as material densities, seismic weights, seismic zone, natural periods of vibration, response spectra, importance factors and seismic load combinations. Large differences between approaches and coefficients are observed. Then, by following Equivalent Lateral Force method (ELF) and simplified modal analysis (S-Modal), the base shear and story shears are calculated for a design peak ground acceleration of 0.20 g, as well as the effects of critical load combinations on the forces and moments acting on the lateral-resisting elements. Particular attention is paid to possible discrepancies and interpretations of certain provisions of the normative documents of the Russian Federation and Tajikistan. This study also proposes a new terminology to emphasize the differences between two countries: the methods of double (DCA) and of single application (SCA) of the combination coefficients.

Conclusions: Overall, it is observed that heavy-masonry-like floor systems with negligible diaphragm action behave differently under seismic motion than most other building typologies. Given the observations in this paper, the applicability of conventional ELF and S-Modal methods for heavy masonry buildings is questionable. The codes however do not introduce modified approaches that address these differences. The paper ends with an appeal for global collaboration under the research project SMARTnet. Further, the paper aims to start discussions within the Russian community and neighboring countries about possible revisions and improvement of certain inaccuracies and ambiguities in the various norms.

Keywords: natural stone walls, seismic demand parameters, seismic code, base shear, seismic weight, load combinations, peak ground acceleration

For citation: Abaev Z.K., Schildkamp M., Saliev M.D. Base shear seismic demand comparison for buildings with natural stone walls in Nepal, Russia and Tajikistan. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 6, pp. 18–45 (In Russian)
DOI: [10.37153/2542-2633-2022-6-18-45](https://doi.org/10.37153/2542-2633-2022-6-18-45)

ВВЕДЕНИЕ

В период с 2007 по 2012 годы голландская неправительственная организация *Smart Shelter Foundation* (SSF) построила сейсмостойкие школы со стенами из природного камня в Непале, которые пережили землетрясение в районе Пурки в 2015 году без каких-либо значительных повреждений. Данные сооружения проектировались, следуя принципу «неинженерного сейсмического проектирования». Термин «неинженерный» применительно к зданиям означает: «те, которые спонтанно и неофициально построены в различных странах в традиционной манере, без какого-либо или с незначительным участием квалифицированных архитекторов и инженеров» [1].

Авторами [2–5] был проведен детальный сравнительный анализ нормативно-технической и научной литературы по строительству зданий со стенами из природного камня в сейсмоопасных регионах нескольких десятков стран, в результате которого были выявлены существенные отличия проектных предпосылок и допущениях, принятых проектирования и конструирования. Особое место уделялось проблеме проектирования «неинженерных» сооружений, которые почти не упоминаются в литературе, в связи с чем авторами начали долгосрочную исследовательскую программу с целью обновления знаний и повышения сейсмостойкости зданий из природного камня, включая подробный анализ затрат и обзор особенностей проектирования в сейсмических нормах и нормах по проектированию зданий из каменной и армочкаменной кладки по всему миру.

Для представления положений и подходов, принятых в РФ в ноябре 2021 года, в данную программу в рамках проекта «Сравнение и уточнение ручных расчетов с компьютерными имитационными моделями для создания надежного метода сейсмического проектирования зданий из природного камня с цементным раствором» наряду с 20 исследователями со всего мира были приглашены исследователи из Северо-Кавказского горно-металлургического института, г. Владикавказ [6]. В настоящей работе представлены результаты совместного исследования, отмечены некоторые неточности и двусмысленности, имеющиеся в нормах Российской Федерации и Республики Таджикистан, а также содержится призыв к началу конструктивной дискуссии по поводу необходимости корректировки некоторых положений норм.

Особую актуальность вопрос оценки сейсмостойкости зданий и сооружений из природного камня имеет для республик Северного Кавказа. Согласно данным Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации [7] в них расположено 575 башен, из них 239 в Чеченской Республике, 201 в Республике Дагестан, 71 в Республике Ингушетия, 56 в Республике Северная Осетия-Алания и 8 в Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесских Республиках. Несмотря на то, что башни Северного Кавказа имеют различное функциональное назначение (жилые, боевые, совмещенные), построены согласно различным архитектурно-строительным традициям (осетинские, абхазские и т.п.), всех их объединяет использование в качестве основного строительного материала местного природного камня [8–10]. Большинство подобных сооружений разрушены либо почти полностью, либо частично, поэтому актуальным становится вопрос их восстановления и реконструкции в соответствии с действующими нормативными документами.

Действующие нормы на строительство в сейсмических районах [44] в РФ (далее – СП РФ) запрещают возведение зданий из природного камня. Несмотря на то, что большее число работ посвящено сравнению нормативных документов различных стран в области сейсмостойкого строительства (к примеру, США, Европы, Японии и Новой Зеландии, Индии, Пакистана, Азербайджана и др.) [1–19], можно выделить несколько присущих им особенностей.

Во-первых, большинство исследований сосредоточены на отдельных позициях, формулах или параметрах проектирования в рамках норм (например [24], где сравниваются восемь азиатских стран), но они не охватывают полный процесс проектирования конкретного типа здания. Во-вторых, если и приводятся примеры расчетов, то почти исключительно для средне- и высокоэтажных зданий с железобетонными или стальными каркасами [21,22].

Однако сравнение сейсмических норм для несущих каменных конструкций, такие как [23,24], встречается реже, тогда как сравнений, включающих сейсмические расчеты для каменной кладки, кроме представленных в [2], не найдено. В связи с вышеизложенным в настоящем исследовании предлагается провести сравнительный анализ расчетных положений для определения сейсмических сил для двух зданий из природного камня – жилого дома и школы, построенных в Гималайском регионе ФДР Непал.

Цель данной работы состоит из нескольких частей: 1. рассмотреть процесс проектирования зданий из природного камня в соответствии с будущим применением сейсмических норм выбранных стран (ФДР Непал, Республика Таджикистан, РФ) чтобы определить верхние и нижние границы сейсмических требований; 2. провести систематическое сравнение формул для определения сейсмической силы в основании сооружений, их отдельных параметров и критериев распределения сейсмических сил, также плотности материалов, преобразования веса в сейсмические нагрузки, сейсмического районирования, категории грунта, собственных периодов колебаний, спектров реакции, ответственности здания и комбинации сейсмических нагрузок; 3. внести предложения и рекомендации о модернизации отечественных норм для последующего обсуждения в среде академического и инженерного сообществ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В статье рассматриваются два объекта исследования: 1) горная школа, построенная фондом USA, пережившая землетрясение в районе Горкха в 2015 году без существенного ущерба; 2) проект сельского дома, типичного для рассматриваемого региона, опубликованный в каталоге проектов по реконструкции после землетрясений, подготовленном Департаментом городского развития ФДР Непал [25].

Здания спроектированы таким образом, чтобы иметь сопоставимый вес (общая постоянная нагрузка), что является справедливой отправной точкой для всех предстоящих (и будущих) сравнений. Двухэтажный дом с гаражом имеет стены толщиной 450 мм (рис. 1а); школа с тремя классами – одноэтажная, с толщиной стен 350 мм и расстоянием между поперечными стенами 6 м (рис. 1б). Оба здания возведены на сплошном каменном цоколе, обрамленном железобетонной стальной балкой и заполненным утрамбованным грунтом, общая высота цоколя 450 мм, имеют легкие деревянные полы и крыши, а стены выполнены горизонтальными монолитными железобетонными поясами. Проемы и углы/пересечения стен не обрамлены вертикальными монолитными сердечниками и арматурными стержнями.

В настоящем исследовании проводится сравнение базовых положений нормативных документов ФДР Непал, РФ и РФ.

Особенности проектирования и работы объектов исследования

Конфигурация зданий – правильная, без резких изменений и срезов, с равномерным распределением стен по плану здания. Объекты исследования не имеют нерегулярностей по высоте. В двухэтажном доме все стены выровнены непосредственно друг над другом (без разрывов), чтобы обеспечить четкие и прямые пути передачи нагрузки на фундамент. Проемы в стенах – небольшие, выровненные по горизонтали и по высоте, расположены прямо над друг над другом на обоих этажах, с одним преднамеренным отличием во внутренней стене для анализа последствий этого отклонения. Кроме того, оба этажа имеют почти одинаковое распределение массы, с одинаковой прочностью и боковой жесткостью элементов, сопротивляющихся горизонтальным воздействиям.

Небольшая асимметрия плана дома из-за габаритов не способствует его кручению. Соотношение размеров плана этажа школы также попадает под установленные пределы, где соотношение длины и ширины не должно превышать 3:1, как указано в нормах проектирования для кладки с низкой прочностью в Норме и 4:1 согласно нормам РФ (п. 6.17.18 СП РФ). Простые и регулярные здания, такие как выбранные объекты исследования, подвержены меньшим неопределенностям при прогнозировании их сейсмического поведения, что отражается в выборе периода анализа, объясненного ранее.

Предполагается, что легкие деревянные перекрытия будут работать как гибкие диафрагмы. Диапазон гибкости определяет «жесткость диафрагмы», при которой стены ведут себя так, как будто они являются изолированными элементами, а увеличение гибкости диафрагмы не влияет на поведение стены» [26]. Гибкие диафрагмы не обладают преимуществами жестких (например, железобетонных плит), такими как перераспределение горизонтальных сейсмических сил между различными элементами бокового сопротивления (пропорционально их жесткости), увеличение пространственной жесткости конструкций и жесткости стен из плоскости. Легкие диафрагмы не увеличивают способность стен выдерживать изгибающий момент и сдвигающие усилия, так как дополнительные осевые напряжения незначительны, но они имеют преимущество в том, что не создают значительных дополнительных сил инерции, а также эффекта кручения.

Учитывая все вышесказанное, рассматриваемые здания, характеризующиеся тяжелыми жесткими стенами и легкими гибкими диафрагмами, ведут себя иначе, чем большинство обычных конструкций (таких как каркасные здания). Основное отличие заключается в том, что большая часть сейсмических сил создается массой тяжелых каменных стен, в то время как вклад легких диафрагм практически незначителен (97,5 против 2,5 % массы). Важным отличием от жестких диафрагм является то, что в случае гибких диафрагм силы инерции перекрытия распределяются на вертикальные поперечные стены пропорционально грузовым площадям. Кроме того, общая устойчивость, предотвращение опрокидывания и расслоения стен повышается за счет включения непрерывных железобетонных поясов на разных уровнях, а также за счет ограниченных размеров плана, использования цементного раствора и включения своих камней в кладку. В связи с этими соображениями и допущениями, непосредственное внимание в данном исследовании уделяется проверке предельной прочности (внутренние силовые факторы, жесткость в плоскости), которая, как ожидается, будет определяющей.

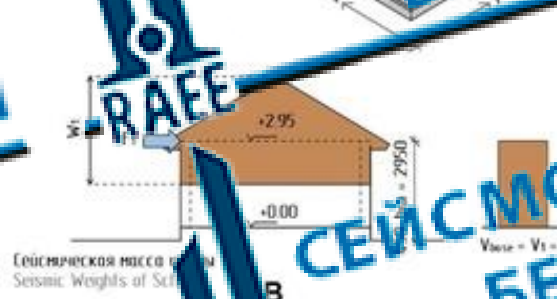
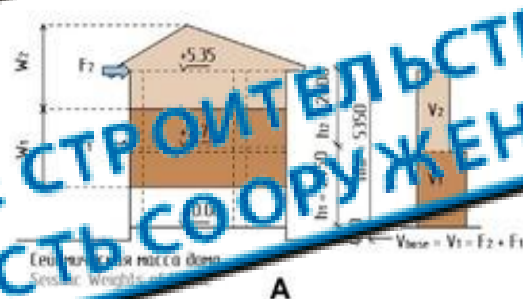
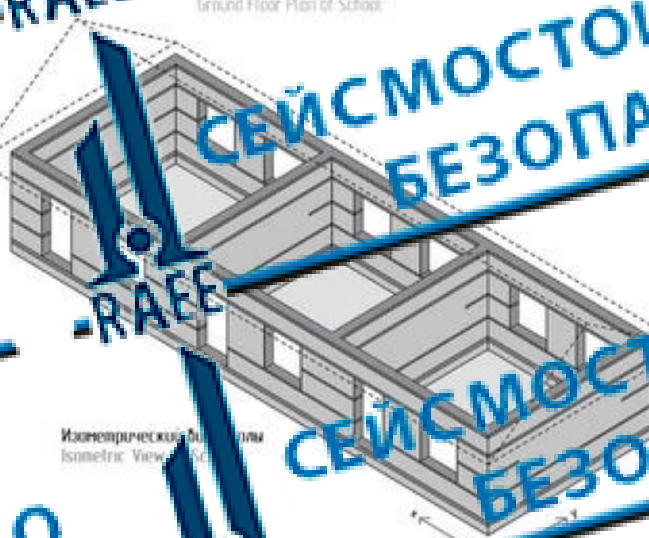


Рисунок 1 – Объекты исследования: а) двухэтажный дом с верандой, б) одноэтажная школа с тремя классами (адоптировано из [2])

Figure 1 – Case study designs based on typical constructions in Nepal: a) two-story house with verandah, b) one-story school with three classrooms (adopted from [2])

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1) Нагрузки и воздействия

Постоянные нагрузки

Наиболее важным фактором, определяющим силы инерции при землетрясении в здании, является его масса. В сельских районах используются, как правило, тяжелые строительные материалы. Для всех зданий собственный вес (DL – от англ. *Dead Load*) несущих и несущих элементов, определяется в соответствии с национальными нормами «Нагрузки и воздействия» [27, 28, 29]. Для более корректного сравнения результатов для РФ и РФ приняты одинаковые значения плотностей материалов (плотность каменной кладки, бетонов, растворов и древесины выражается в кН/м^3 , а собственный вес фанеры и кровельных листов – в кН/м^2) с учетом соответствующих коэффициентов надежности по нагрузке γ_f . Плотность кладки определяется как суммарная плотность камней и раствора из соотношения 70:30 % с последующим добавлением слоев оштукатуривания +5% для дома и +7% для школы. Значения плотностей материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Плотности материалов

Table 1 – Densities of materials

Страна Country	Ед. изм. Unit	Республика Density, ρ^4	РФ и Т Russia and Tajikistan Density	γ_f	$\rho \times \gamma_f$
Материалы Materials					
Песчаник бутовый Sandstone masonry	кН/м^3 kN/m^3	22,00	22,46	1,1	24,71
Железобетон Reinforced concrete	кН/м^3 kN/m^3	23,4	24,52	1,1	26,97
Раствор/штукатурка Mortar/plaster	кН/м^3 kN/m^3	20,10	17,35	1,3	22,55
Конструктивная древесина Construction wood	кН/м^3 kN/m^3	5,1	4,9	1,1	5,39
Фанера Plywood	кН/м^2 kN/m^2	0,06	0,06	1,3	0,121
Кровельные листы Roofing sheets	кН/м^2 kN/m^2	0,045	0,045	1,3	0,059

Примечание:

Коэффициенты надежности по нагрузке γ_f принимаются согласно п. 7.2 СП 20.13330.2016

Отдельно следует рассмотреть вопрос преобразования сейсмические массы в существующих нормах. В таблице 5.1 СП РФ и таблице 2, прил. 4 СНиП Т 22-07-2018 [30] (далее СНиП РТ) представлены коэффициенты сочетаний нагрузок n_s , равные 0,2, 0,8 и 0,5 для постоянных, временных длительных и временных кратковременных соответственно. Согласно п. 6.5 СП 20.13330.2016 данные коэффициенты используются в общем сочетании нагрузок. Однако открытым, с нормативной точки зрения, остается вопрос: какую долю статической массы преобразовывать в сейсмическую при построении расчетной динамической модели (РДМ)? В пособии по проектированию каркасных промзданий [31] представлены примеры определения сейсмических нагрузок с коэффициентами сочетаний, применяемыми при сборе нагрузок, однако при составлении сочетаний нагрузок не показан. В другом источнике [32] нагрузки также определяются с учетом коэффициентов сочетаний, однако уже не используются при составлении сочетаний. Часть практикующих инженеров [33], а также некоторые разработчики программного обеспечения [34] все же используют коэффициенты из таблицы 5.1 дважды: первый раз, для преобразования статических нагрузок в динамические, второй – непосредственно в сборе

сочетании нагрузок. Тем не менее, некоторые из указанных источников рекомендуют использовать всю статическую массу при составлении РДМ, иными словами, применяют коэффициент преобразования равный 1,0.

Подобные разногласия и противоречия обусловлены отсутствием в нормативной литературе строгих определений «коэффициента преобразования». Авторы предлагают введение четкой терминологии для коэффициента преобразования и коэффициента сочетаний, поскольку очевидно, что наличие подобных определений либо официальных рекомендаций по преобразованию статической массы, следует считать целесообразным. В настоящем исследовании предлагается использовать следующие определения, подчеркивающие отличия между отмеченными подходами: *метод двойного приложения (МДП)* и *метод единичного приложения (МЕП)* коэффициентов сочетаний.

В настоящем исследовании для РФ применяется МДП с использованием коэффициентов сочетаний из таблицы 5.1 СП РФ, для МДП – МЕП с использованием коэффициентов из таблицы 4 СНиП РТ, реализованный в работе [2], в которой коэффициенты сочетаний использовались единожды на этапе сбора нагрузок и не учитывались при составлении комбинации нагрузок (см. далее).

Авторы призывают коллег и читателей поделиться своим мнением по данному вопросу.

Временные нагрузки и общий сейсмический вес

Общий сейсмический вес (W_{tot}) обычно определяется как сумма постоянной нагрузки (DL) плюс части временной нагрузки (LL) и снеговой нагрузки (SL), для которых коэффициенты сочетания приведены в сейсмических нормах или соответствующих нормах «Нагрузки и воздействия». Все сейсмические нормы указывают, что ветровые нагрузки не учитываются одновременно с нагрузками от землетрясений. В обоих зданиях первый этаж построен без соединения между колоннами, поэтому LL первого этажа исключается, так как нагрузки передаются непосредственно на грунт основания.

Несмотря на то, что согласно нормам РФ и Республики Таджикистан снеговая нагрузка SL всегда включается в расчет, в Непале она не учитывается вовсе. Однако, следует отметить, что в соседней Индии ее учет ограничен только тяжелыми условиями, например, когда расчетная снеговая нагрузка превышает $1,5 \text{ кН/м}^2$, иными словами – слой свежего снега в 1,5 м или 75 см слежавшегося снега [35].

Такой сильный снегопад происходит, как правило, на больших высотах, которые часто малонаселены, где плоские крыши более распространены, чем скатные, из-за высокой скорости ветра, и люди заботятся о том, чтобы как можно быстрее удалить тяжелые снеговые мешки. Исходя из вышеизложенного, а также для возможности сравнения с референтным расчетом для Непала, в настоящем исследовании снеговая нагрузка SL не учитывается.

Согласно п. 8.2.1 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» временные равномерно распределенные нагрузки, представленные в п. 8.3, являются кратковременными, т.е. коэффициент сочетаний нагрузок для них $\eta = 0,1$. Нормативный документ Республики Таджикистан МСН 20-02-2013 являясь, по сути, идентичным российскому, тем не менее, нигде не указывает на долю длительности распределенных нагрузок (таблица 7.2), подчеркивая лишь их конструктивную принадлежность (на плиты перекрытий, лестницы). Несмотря на то, что таблица 2 (прил. 1) коэффициенты сочетания) СНиП РТ устраняет указанную неопределенность, также определяя нагрузки на перекрытия как кратковременные (аналогично таблице 5.1 СП РТ), авторы настоящей работы на этапе консультаций и подготовки материала столкнулись с другой интерпретацией длительности временных нагрузок для Республики Таджикистан, весьма распространенной среди инженеров и академического сообщества, а именно как длительных действующих ($\eta = 0,8$). Авторы работы также приглашают коллег и читателей к дискуссии по данному вопросу.

Различные интерпретации доли длительности временно равномерно распределенных нагрузок могут, по-видимому, объясняться тем, что в более ранних редакциях СНиП «Нагрузки и воздействия» (2011 г. и 1985 г.) слово «кратковременных» также было упомянуто.

В настоящем исследовании для значений равномерно распределенной временной нагрузки для РФ используется коэффициент сочетаний $n_c = 0,5$. Для РТ рассматривается вариант с использованием коэффициента сочетаний $n_c = 0,8$ [2]. Значения временных нагрузок представлены в таблице 2.

Сейсмический вес W (на уровне i -го этажа) условно объединяются на вершине обоих зданий и на уровне первого этажа дома. Поскольку цоколь плотно заполнен грунтом, он рассматривается как часть грунта, поэтому уровень $\pm 0,000$ м начинается на вершине цоколя (рис. 1). Формы Непала специально описывают распределение весов от середины высоты этажа на соответствующие уровни выше и ниже. Нижняя половина стен первого этажа не учитывается в W_{tot} , что означает, что для дома более 25 % от общего DL (минус цоколь) не учитывается в сейсмическом весе, а для школы почти 50 %.

Для РФ и Республики Таджикистан распределение производится в соответствии с коэффициентом, зависящим от формы информации зданий η_k :

– для РФ:

$$\eta_k = \frac{x_k \sum_{j=1}^n m_j x_j}{\sum_{j=1}^n m_j x_j^2} \quad (1)$$

– для РТ:

$$\eta_k = \frac{x_k \sum_{j=1}^n Q_j x_j}{\sum_{j=1}^n Q_j x_j^2} \quad (2)$$

где m_j – масса здания или сооружения, отнесенная к узловой точке j ,

x_k и x_j – расстояния от точек k и j до верхнего обреза фундаментов.

где m_j – вес здания или сооружения, отнесенный к узловой точке j ,

x_k и x_j – расстояния от точек k и j до верхнего обреза фундаментов.

Распределение сейсмического веса для дома и школы представлены в таблице 3.

Таблица 2– Временные нагрузки

Table 2 – Live loads

Страна Country		Непал Nepal		РФ Russia		РТ Tajikistan	
Временная нагрузка Live load	Ед. изм. Unit	C_{comb}	LL	n_c^1	$LL \times \gamma_f$	n_c^2	$LL \times \gamma_f$
на первом этаже – on first floor	кН/м ² kN/m ²	0,3	2,0	0,5	$1,5 \times 1,3$	0,8	$1,5 \times 1,3$
на веранде – on veranda 1st floor	кН/м ² kN/m ²	0,3	3,0	0,5	$4,0 \times 1,2$	0,8	$4,0 \times 1,2$

Примечание.

γ_f – коэффициенты надежности по нагрузке, принимаемые согласно п. 3.2.2 СП 20.13330.2016.

2) Определение сейсмических сил в основании сооружения

В данном разделе анализируются и сравниваются методы расчета и соответствующие формулы для определения сейсмической силы в основании сооружения, приведенные к виду метода эквивалентной поперечной силы или эквивалентному статическому методу [36] для расчета по первой группе предельных состояний кладки из природного камня объектов исследований.

Цель данного анализа – определить, какой нормативный документ является наиболее толерантными или наиболее консервативными по отношению к данному методу. В духе «неинженерного сейсмического проектирования» основное внимание уделяется упрощенному подходу, выполняющему, по возможности, ручные расчеты.

Критерии работоспособности и предельные состояния

Для проектирования и проверки конструкций большинство современных норм определяют так называемые *Performance Objectives* – критерии (уровни) работоспособности и устанавливают предельные состояния для проверки конструктивных элементов.

Критерии работоспособности определяются как соотношение между ожидаемой сейсмической опасностью (расчетный уровень землетрясения) и приемлемым ущербом (уровень эффективности здания, или предельное состояние). Рекомендуемые расчетные уровни предназначены для «частых, случайных, редких и очень редких землетрясений», исходя из вероятности превышения в течение срока службы здания и/или интервала повторяемости, в том числе как рекомендуемые критерии работоспособности обычно делятся на полностью работоспособные, работоспособные, безопасные для жизни и близкие к обрушению».

Две группы предельных состояний – абсолютные предельные состояния (*Ultimate Limit States – ULS*) которые ведут к полной непригодности и эксплуатации или к полной (частичной) потере несущей способности, функциональности предельные состояния (*Serviceability Limit States – SLS*) затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкций или уменьшающие их долговечность [37, 44].

Российские нормы (п. 5.2 СП РФ) выделяют две расчетные ситуации – Расчетное землетрясение (РЗ) и Контрольное землетрясение (КЗ). Основная цель расчета на действие РЗ – недопущение частичной или полной потери эксплуатационных свойств («Не-обрушение», *No-collapse ULS*), на действие КЗ – оценка общей устойчивости, неизменяемости, однородности конструкций сооружения («Ограничение повреждений», *Damage limitation*). Нормы Республики Таджикистан не определяют четких критериев работоспособности, выделяют лишь сами методы расчета – спектральный и прямой динамический метод (п. 14 СНиП РТ), а также возможности применения данных методов.

Таблица 3– Распределение сейсмического веса (массы)

Table 3 – Distribution of seismic weights (masses)

Страна Country		Непал Nepal	РФ (0.9 + 0.5) Russia (0.9 + 0.5)		РТ (0.9 + 0.5) Tajikistan (0.9 + 0.5)	
Общий сейсмический вес, Total seismic weight, W_{tot}	Ед. изм. Unit		η_i	$(\eta_i \times W)$	η_i	$(\eta_i \times W)$
Дом / House, W_1 (5,35 м+)	кН kN	3013,0	0,332	498,7	0,339	501,4
Дом / House, W_2 (2,75 м+)	кН kN	766,2	0,085	525,8	0,089	146,4
Дом / House, W_{tot}	кН kN	1104,1	0,417	1024,5	0,428	1047,8
Дом / House, $W_{tot,house}^3$	%	74,9	68,7	89,70 ²	70,3	89,71 ²
Школа / School, $W_1 = W_{tot}$ (2,95 м+)	кН kN	720,1	0,639	740,1	1,00	740,1
Дом / House, $W_{tot,school}$	%	52,6	47,5	100,0 ²	47,5	100,0 ²

Примечания:

1. Сейсмический вес, коэффициент, зависящий от формы деформаций зданий η_i и распределенный сейсмический вес $\eta_i \times W$ с учетом применения коэффициентов преобразования для постоянной и временной нагрузок.

2. Процент активной сейсмической массы, определяемый как отношение суммы распределенных масс к общей массе, согласно нормам принимаемый не менее $\eta_{tot,house} = 0,90$ (90 %) и $\eta_{tot,school} = 1,0$ (100 %).

Для рассматриваемого примера для дома:

$$\%_{(0.9+0.5)} = \frac{(\eta_2 \cdot m_2) + (\eta_1 \cdot m_1)}{m_2 + m_1} = \frac{(0,332 \cdot 374,3) + (0,085 \cdot 767,7)}{374,3 + 767,8} \cdot 100\% = 86,6\%.$$

$$\%_{(0,9+0,8)} = \frac{(\eta_2 \cdot Q_2) + (\eta_1 \cdot Q_1)}{Q_2 + Q_1} = \frac{(1,339 \cdot 374,3) + (0,689 \cdot 791,6)}{374,3 + 791,6} \cdot 100\% = 89,71\%.$$

3. Процент общего сейсмического веса для дома $W_{tot,house}$ и школы $W_{tot,school}$ в сравнении с общим весом DL (без цоколя)

В настоящем исследовании рассматривается обобщенный случай проверки первого предельного состояния и уровня работоспособности, соответствующего безопасному для жизни.

Сравнение критериев работоспособности представлено в таблице 4.

Определение расчетного землетрясения

Согласно нормам Непала для проверки абсолютного предельного состояния рассматривается «редкое землетрясение», которое характеризуется 10% вероятностью превышения (*probability of exceedance, PE*) заданного уровня сейсмичности в течение 50 лет ($10\%PE_{50y}$) или средним периодом между землетрясениями (*return period, RP*) 475 лет (RP_{475}).

Согласно п. 4.3 СНиП [1] такое землетрясение соответствует карте общего сейсмического районирования (ОСР, 2015) «А» с единственным отличием в интервале между землетрясениями 500 лет (RP_{500}). Следует, однако, подчеркнуть, что согласно таблице 4 СНиП здание школы должно проектироваться в соответствии с картой «В», поэтому для школы $5\%PE_{50y}$ и RP_{1000} .

Подход, примененный в нормах Республики Таджикистан не основан на вероятностном подходе: в Приложении 3 СНиП РТ представлена карта ОСР Республики Таджикистан со значениями нормативной сейсмичности 7,8 и 9 баллов по шкале MSK-64.

Методы расчета на сейсмическое воздействие

Методы расчета на сейсмическое воздействие включают в себя линейные (упругие) методы, такие как метод эквивалентной поперечной силы (*Equivalent Lateral Force, ELF*) и модальный анализ спектра реакций, а также нелинейные (неупругие) методы, такие как нелинейный статический (*Pushover-анализ*) и расчет во временной области с использованием инструментальных или синтезированных акселерограмм. Следуя принципу «неинженерного сейсмического проектирования» основное внимание уделяется статической линейной процедуре, которая идеализирует конструкцию как систему с одной степенью свободы и основным периодом колебаний. Движение грунта при землетрясении заменяется эквивалентными («эквивалентными») статическими горизонтальными силами, которые равны силе в основании сооружения. Как правило, массы принимаются сосредоточенными в уровне этажа, а силы, действующие на этаж, используются для определения перемещений и внутренних силовых факторов. Расчет максимальной силы в основании сооружения по эквивалентному статическому методу также позволяет провести более наглядное сравнение рассматриваемых нормативных документов.

Таблица 4 – Критерии работоспособности для расчета по пределу предельному состоянию

Table 4 – Performance objectives for Ultimate Limit State verifications

Страна Country	Критерий работоспособности Performance objective	Расчетное землетрясение Earthquake design level	Метод расчета Method	Ограничения и конструктивные требования Conditions and structural requirements
Непал Nepal	Сохранение жизни (life-safety)	$10\%PE_{50y}$ или RP_{475}	Эквивалентный статический метод (ELF)	$H < 15$ м и $T_1 < 0,5$ с (не рекомендуется для школ)
РФ Russia	Не-обрушение (no-collapse) для дома и школы – Ограничение повреждений (damage limitation) для школы.	$10\%PE_{50y}$ или PE_{500} (карта ССР-2015 “А”) для дома – $5\%PE_{1000}$ или RP_{1000} (карта ССР-2015 “В”) для школы	– Упрощенный модальный анализ (S-Modal) для дома и школы – Расчет по временной области для школы	$H \leq 5$ этажей $T_1 < 0,4$
РТ Tajikistan	Сохранение жизни (life-safety)	Шкала интенсивности MSK-64	– Упрощенный модальный анализ (S-Modal)	$H < 5$ этажей $T_1 < 0,4$

Основным условием использования эквивалентного метода является то, что здания должны быть правильной формы как в плане, так и по высоте. Для обоих рассматриваемых зданий эти условия выполнены. Нормы Непала также устанавливают следующие ограничения по высоте $H < 15$ м и периоду основного тона колебаний $T_1 < 0,5$ сек.

Российские и таджикские нормы требуют проведения модального анализа спектра реакций (называемого спектральным или линейно-спектральным методом), согласно которому сейсмический вес на каждом уровне умножается на коэффициент, зависящий от формы деформаций зданий η_{ik} , который учитывает смещения на разных уровнях этажей для различных форм колебаний. Однако для простых зданий ($H \leq 5$ этажей и $T_1 < 0,4$) согласно п. 18 СНиП РФ и п. 25 СНиП РТ допускается использовать только первую форму колебаний (упрощенный модальный анализ, S-Modal). В этом случае анализ S-Modal становится аналогом метода ELF, с той лишь разницей, что S-Modal включает уменьшенную часть общего сейсмического веса.

Однако следует иметь в виду, что ELF рассчитывает максимальную силу в основании сооружения вследствие чего этот метод имеет тенденцию завышать ее значения для короткопериодных зданий из-за включения полного сейсмического веса, в отличие от модального анализа спектра отклика, который объединяет эффективный вес всех форм колебаний, из которых эффективный вес первой формы обычно составляет 60–80% от общего сейсмического веса [45]. Для каменной кладки рекомендуется включать 90% эффективной (или эквивалентной) сейсмической массы [39], что согласуется с методом S-Modal в РФ и РТ, где для дома учитывается 89,7% сейсмической массы (см. таблица 3).

Поперечная сила в основании сооружения согласно эквивалентному статическому методу определяется максимальной поперечной силой, возникающей в основании сооружения в результате сейсмических воздействий. В большинстве нормативных документов формула для расчета силы в основании сооружения представлена в виде коэффициента сейсмического ускорения, приложенного в центре масс сооружения и определяемого в направлении ускорения силы тяжести (g), которая также должна быть умножена на общий сейсмический вес сооружения (W_{tot}). Большинство формул построены (или могут быть записаны) аналогичным образом и выражают силу в основании сооружения как функцию спектрального ускорения, которое должно быть уменьшено на

коэффициент, учитывающий особенности конструкции (коэффициент поведения конструкции). Спектральное ускорение является результатом пикового ускорения грунта (PGA) в подстилающем слое ($PGA_{\text{подстилающий}}$), которое сначала усиливается напластованными грунтами (пиковое ускорение грунта на уровне поверхности $PGA_{\text{поверхность}}$), а затем изменяется конструкцией в зависимости от ее основного периода колебаний. Спектральное ускорение строится в виде упругого (нередуцированного) спектра реакции как функция T для данного профиля площадки; в дальнейших сравнениях скальная порода принимается за эталонный грунт. Спектр упругой реакции затем умножается на коэффициент поведения конструкции, который в общем случае учитывает присутствие неупругих свойства системы бокового сопротивления конструкции, такие как пластичность, избыточная прочность и рассеивание энергии, хотя для каменной кладки они, как ожидается, будут минимальными. В большинстве норм это называется спектром расчетной реакции, но, чтобы избежать путаницы в терминологии, в данной работе используется термин «уменьшенный (неупругий) спектр реакции» (по сравнению с неумноженным (упругим) спектром реакции). Сила в основании сооружения может быть также дополнительно увеличена из-за ответственности конструкции. Это приводит к следующему концептуальному представлению поперечной силы в основании сооружения для проверки по первому предельному состоянию:

$$\text{Сила в основании} = \frac{(PGA_{\text{подстил.}} \cdot \text{грунт}) \cdot \text{спектральное усиление} \cdot \text{ответственность} \cdot \text{сейсмический вес}}{\text{поведение конструкции}}$$

где $(PGA_{\text{подстил.}} \cdot \text{грунт}) \cdot \text{спектральное усиление}$ – спектральное ускорение

$$(PGA_{\text{подстил.}} \cdot \text{грунт}) = PGA_{\text{поверхность}} \cdot$$

В таблице 3 представлены формулы для расчета поперечной силы в основании сооружения, переписанные в соответствии с концептуальной формулой, представленной выше. В последнем столбце указаны дополнительные требования или ограничения. Так как упрощенный модальный анализ рассматривает только первую форму колебаний, он может быть концептуально переписан с учетом того, что сейсмический вес (Q_{tot}) не полностью включен (для дома), путем умножения на коэффициент зависящий от формы деформации (Q_k) в качестве дополнительной константы ($\eta_{\text{tot, дом}} = 0,90$ и $\eta_{\text{tot, школа}} = 1,0$, см. таблица 3 и таблица 8).

Все компоненты концептуальной формулы представлены в последующих пунктах. Для каждой формулы необходимо определить расчетное пиковое ускорение грунта (PGA) для возможности сравнения воздействия на конкретное сооружение, вызванное грунтовыми условиями, и конструктивными характеристиками, как это предписывается нормами для различных уровней сейсмичности. Все соответствующие значения и коэффициенты, которые используются для сравнений, представлены в таблицу 8.

Грунтовые условия

Поскольку местные грунтовые условия оказывают значительное влияние на пиковое ускорение грунта и форму спектра отклика [47], необходимо определить референтный грунт основания сооружения.

В нормах Нега выделены 4 класса грунтов, используют различные параметры: 1) твердые породы и жесткие грунты (тип A) – по прочности на сжатие без ограничения (в кПа), 2) мягкие грунты (тип C) – по стандартным значениям испытания на проникающую способность (N_{SPT} в ударах/30 см) или – по прочности на сдвиг в уплотненном состоянии (s_u в кПа). Строительство на слабых грунтах (тип D) следует избегать.

В нормах РФ (таблица 4.1) и РТ (приложение 4, таблица 1) классифицируются по средней скорости распространения поперечных волн для 30-метровой толщи ($v_{s,30}$ в м/с), СП РФ также вводит дополнительный параметр «сейсмическая жесткость» равный отношению модуля упругости грунта на скорость распространения поперечных волн ($\rho \cdot V_s$).

В настоящем исследовании в качестве эталонного грунта основания принимается скальный грунт с $v_{s,30}$ от 600–750–800 м/с, что соответствует типу A в Негае и категории грунта по

сейсмическим свойствам I в РФ и РТ. Следует также отметить, что скальный грунт является наилучшим возможным вариантом, но тот факт, что большая часть зданий из природного камня располагается в горных районах, обязательно означает, что все участки имеют благоприятные почвенные условия, поэтому местные грунтовые условия всегда должны рассматриваться в каждом конкретном случае.

таб. 5 – Концептуальные формулы для расчета по первому предельному состоянию

Table 5 – Conceptual base shear formulas for ULS verification

Страна Country	Поперечная сила в основании Base shear	Обобщенная формула для расчета по первому предельному состоянию Combined and re-written for ULS verification	Требования и ограничения Requirements and restrictions
Непал Nepal	$V = C_d(T_1) \cdot \frac{C_h(T_1) \cdot Z \cdot I}{C_d(T_1) \cdot (R_u \cdot \Omega_u)} \cdot W$	$V = \frac{Z \cdot C_h(T_1)}{R_u \cdot \Omega_u} \cdot I \cdot W$	$C(T_1) = C_h(T_1) \cdot Z \cdot I$ $I = \frac{\sum_i W_i \cdot h_i}{\sum_i W_i \cdot h_i} \cdot V$
РФ Russia	$S_{ik} = K_0 \cdot K_1 \cdot S_{0ik}$ $S_{0ik} = m_k \cdot A \cdot \beta_i \cdot x_\psi \cdot \eta_{ik}$	$S_{ik} = \frac{A \cdot \beta_i}{1 + \frac{1}{K_1 \cdot K_\psi}} \cdot K_0 \cdot \eta_{ik} \cdot m_k$	$\eta_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n m_j \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n m_j \cdot x_j^2}$
РТ Tajikistan	$S_{ik} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot S_{0ik}$ $S_{0ik} = Q_k \cdot \frac{A \cdot \beta_i}{1 + \frac{1}{K_2 \cdot K_\psi}} \cdot \eta_{ik}$	$S_{ik} = \frac{A \cdot \beta_i \cdot K_3}{1 + \frac{1}{K_2 \cdot K_\psi}} \cdot K_1 \cdot \eta_{ik} \cdot Q_k$	$\eta_{ik} = \frac{x_k \cdot \sum_{j=1}^n Q_j \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n Q_j \cdot x_j^2}$

Обозначения в таблице 5:

V – полная горизонтальная сила в основании;

$C_d(T_1)$ – расчетный коэффициент сейсмического участия;

$C(T_1)$ – расчетное горизонтальное ускорение упругого спектра;

$Z = A$ – фактор сейсмического зонирования и расчетное ускорение основания;

S_{ik} и S_{0ik} – расчетная сейсмическая нагрузка для i -й формы колебаний в уровне l ;

$C_h(T_1)$ и β_i – коэффициент спектрального усиления и коэффициент динамичности;

K_2 – коэффициент, учитывающий высоту зданий и сооружений;

$R_u = K_1$ (РФ) = K_2 (Таджикистан) – коэффициент редукции, коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции и допускаемые повреждения;

K_ψ – коэффициент, учитывающий способность здания и сооружения к рассеиванию энергии;

Ω_u – коэффициент перестройки;

$I = K_0$ (РФ) = K_1 (Таджикистан) – коэффициент, учитывающий степень ответственности зданий и сооружений;

$W = Q_k = m_k$ – сейсмический вес, сейсмическая масса;

h_i – высота расположения сейсмического веса от уровня приложения сейсмического воздействия (обреза фундамента);

η_{ik}, x_k, x_j – см. формулы 1 и 2.

Расчетное пиковое ускорение грунта

Интенсивность ожидаемого движения грунта на данном участке (сейсмичность площадки строительства) выражается в виде расчетного пикового ускорения грунта (PGA). Расчетные уровни землетрясений определяются нормами либо через установленные значения PGA , соответствующие

определенному сейсмическому районированию, либо путем интерполяции карт контуров сейсмической опасности, либо путем таблицы координат конкретного объекта. Сейсмические зоны и соответствующие им PGA показаны в таблице 6.

Непал назначает коэффициент сейсмического районирования (Z) для выбранных основных локалий, или же Z определяется путем приблизительной интерполяции между контурными линиями карты сейсмического районирования. В нормах РФ и Республики Таджикистан значения PGA относятся к сейсмичности площадок, где за эталон принята категория грунта II. Например, сейсмичность площадки 9 равняется $A = 0,40$ g. Однако на скальном грунте (категория I) разрешается использовать расчетные значения на один уровень интенсивности меньше, таким образом, зона 9 становится зоной 8 с $A = 0,20$ g. Фактически это означает, что на скальном грунте сила в основании сооружения уменьшается наполовину.

Период собственных колебаний

Спектральное ускорение сооружения в основном зависит от его основного (или собственного) периода колебаний T_1 (в секундах). Основными параметрами, влияющими на T_1 , являются вес и высота здания, а также жесткость элементов несущей системы зданий и их распределение в плане и по высоте. Чем выше здание, тем больше его T_1 , чем тяжелее здание, тем больше его T_1 , и чем жестче здание, тем меньше его T_1 . Как правило, для жестких одноэтажных зданий T_1 составляет около 0,05 с [40]. Большинство сейсмических норм представляют эмпирические формулы для определения характерного периода T_1 вдоль каждого основного направления здания.

Таблица 6 – Отношение между сейсмическими зонами, расчетным пиковым ускорением грунта и разрешенными методами расчета зданий из природного камня

Table 6 – Relation between seismic zones, design peak ground accelerations and allowed methods of analysis for natural stone walls

Непал Nepal				РФ и РТ Russia and Tajikistan			
PGA	Зона Zone	Z	Ан. An.	PGA	Балл Magnitude	A	Ан. An.
0,1	—	—	—	0,1	7	0,1	s.mod
0,2	—	—	—	0,2	8	0,2	s.mod
0,25	1	0,25	ELF	—	—	—	—
0,3	2	0,30	ELF	—	—	—	—
0,35	3	0,35	ELF	—	—	—	—
0,4	4	0,40	ELF	0,4	(9)	(0,4)	н.т.

Обозначения в таблице 6:

«Ан.» – метод анализа; *ELF* – эквивалентный статический метод; *s.mod* – упрощенный спектральный метод;

«н.т.» – анализ не требуется.

В Непале используется приблизительная формула $T_1 = (k_1 \cdot H^{3/4}) \cdot 1,25$, которая применима ко всем конструктивным системам при условии, что высота здания не превышает 40 м. Она применяется к обоим основным направлениям здания и в основном зависит от его высоты H , которая умножается на числовой коэффициент k_1 , зависящий от типа конструкции. Высота ограничена высотой самой верхней части конструкции.

В нормах РФ и Республики Таджикистан не имеется формулы для расчета основного периода колебаний. В настоящем исследовании использовалась эмпирическая формула, представленная в [41]. Следует также отметить, что единственным определением высоты в СП РФ и СНиП РТ является расстояние от верха фундамента до соответствующей массы/уровня (см. формулы 1 и 2).

Поскольку вся масса зданий в рассматриваемых примерах находится именно в стенах, разумным является определение H по вершине.

Сравнение уравнений и расчет основного периода колебаний для рассматриваемых зданий представлены в таблице 7.

Спектральное усиление

Форма спектра отклика (коэффициент динамичности β в РФ и РТ) показывает идеализацию того, как собственный период колебаний и демпфирование здания влияют на его реакцию при землетрясении с точки зрения максимального усиления P_{GMA} поверхности. Форма спектра состоит, как правило, из 3–4 ветвей, из которых только первые два сегмента представляют интерес для рассматриваемых зданий. За короткопериодной реакцией, начинающейся с опорной точки (PGA) и линейно возрастающего спектрального ускорения, следует плато постоянного спектрального ускорения. На рисунке показаны первые две ветви спектра отклика упругого (нередуцированного) грунта для скального грунта с 5% затуханием для всех выбранных стран:

- для Непала: тип грунта – А, границы плато 0,1–0,5 с;
- для РФ: грунты I–II категории, границы плато 0,1–0,4 с;
- для Республики Таджикистан: грунты I категории, границы плато 0,1–0,35 с.

Коэффициент затухания, как правило, понимается равным $\zeta = 5\%$ для всех типов кладки. Значения коэффициента, учитывающего особенности работы конструкции (следующий раздел) в нормах обычно также калибруются для 5%. Однако данное утверждение может потребовать подтверждения в будущем, поскольку имеем лишь ограниченные данные о коэффициентах затухания для кирпичной кладки на известковых или гравельных растворах с большим разбросом результатов от 1 до 9% [41], тогда как для кирпичной кладки на цементном растворе подобных данных не найдено.

Таблица 7 – Сравнение уравнений и расчет основного периода колебаний для рассматриваемых зданий

Table 7 – Comparison of equations and calculations of Natural Periods of Vibration for the case study buildings

Страна / Country	Уравнение / Equation	Направление / Direction	Дом / House			Школа / School		
			k_t	h (м)	T (с)	k_b, C_t	h (м)	T (с)
Непал / Nepal	$T_1 = (H/4)^{1,25}$	x, y	0,0500	3,5	0,220	0,0500	2,95	0,141
РФ и РТ / Russia and Tajikistan	Уравнение / Equation	Направление / Direction	b (м)	h (м)	T (с)	b (м)	h (м)	T (с)
		x	5,5	3,5	0,206	6,7	2,95	0,103
		y	7,75	3,5	0,174	19,4	2,95	0,061

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции (структурный фактор)

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции, позволяет снизить упругое спектральное ускорение, вводя нелинейные (неупругие) механизмы, присущие типологии конструкции и материалам здания, такие как текучесть, пластичность, избыточная прочность и свойства рассеивания энергии. Поэтому в нормах проводится четкое различие между неупругим неуменивающим откликом (требующим отсутствия повреждений) и уменьшенным расчетным спектром (с допустимыми повреждениями, но без обрушения для расчета по первой группе предельных состояний).

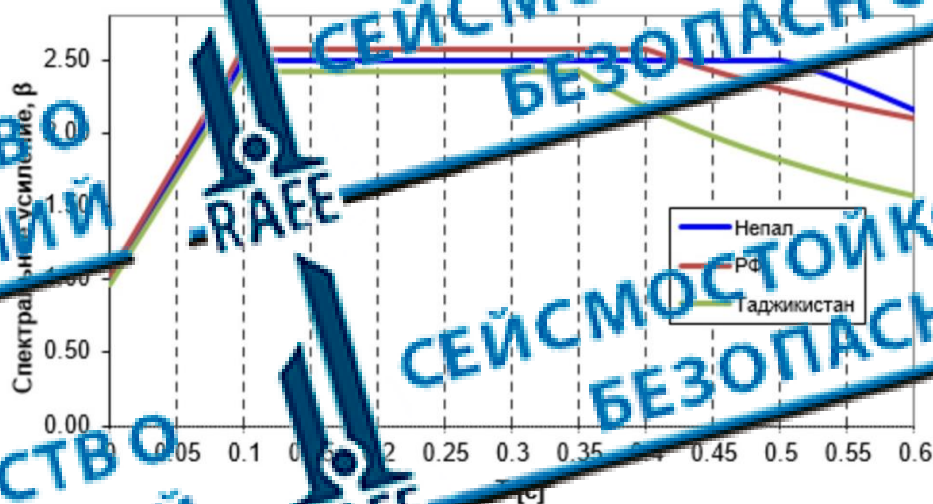


Рисунок 2 – Упругий спектр отклика с 5% затуханием

Figure 2 – Elastic response spectra for rock soil with 5% viscous damping

Диапазон неупругих деформаций каменной кладки, как правило, очень ограничен из-за относительной хрупкости раствора. Однако каменная кладка хорошего качества обладает значительной способностью к сдвигу и рассеиванию энергии, а также большой способностью к нелинейной деформации при умеренных уровнях повреждения [43]. Этот показатель может быть повышен еще больше за счет повышения прочности раствора, а также за счет включения непрерывных горизонтальных поясов для улучшения пространственной работы сооружения.

Нормы Непала определяют коэффициент пластичности $R_u = 2,0$ для номинально армированной кладки (*partially reinforced masonry, NMR*) с горизонтальными поясами и вертикальными арматурными стержнями, который должен быть уменьшен на коэффициент перегрузки $\Omega_r = 1,2$. Без вертикальных стержней предполагается, что $R_u \cdot \Omega_r = 1,0$.

Нормы Республики Таджикистан уменьшают спектр с помощью коэффициента редукции, учитывающего конструктивные решения зданий и сооружений ($K_2 = 1,45$ для каменной кладки) и коэффициента рассеивания энергии ($K_v = 1,0$), что составляет общее снижение $1 / (K_2 \cdot K_v) = 0,69$.

В РФ обозначенный коэффициент редукции можно записать в следующем виде $1 / (K_1 \cdot K_v) = 1 / (0,4 \cdot 1,0) = 2,5$, где $K_1 = 0,4$ – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения для каменной кладки, $K_v = 1,0$ – коэффициент, учитывающий способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии.

Коэффициент, учитывающий степень ответственности зданий и сооружений:

Последний компонент сейсмической силы представлен в виде коэффициента, учитывающего степень ответственности зданий и сооружений. Все нормы присваивают коэффициент 1,0 для обычных (жилых) зданий и более высокий коэффициент от 1,1 (РФ) до 1,5 (Непал) для школ, так как они представляют больший риск из-за постоянного пребывания большого количества людей. Они также должны оставаться работоспособными после стихийного бедствия, например, после землетрясения в районе Гурка в 2015 году школы SSF выполняли функции пунктов первой помощи и временного убежища.

Нормы Таджикистана в значительной степени отклоняются от значений, указанных выше: коэффициент важности $K_1 = 0,25$ для домов и до $K_1 = 0,35$ для школ (больше на 40%).

Сравнение сейсмической силы в основании сооружения

Результаты сравнения сейсмической силы в основании сооружения со значениями всех компонентов представлены в таблице 8 в следующем виде: «Сила в основании» = $PGA \cdot C_{RS} \cdot W$, где коэффициент C_{RS} представляет собой «коэффициент усиления для зданий из кладки из природного

камня» – отношение максимального ускорения грунта к коэффициенту, учитывающему особенности работы конструкции (структурный фактор). Извлекая расчетную РСН и предполагая, что сейсмический вес является истинным, можно только сравнить данные коэффициенты для рассматриваемых стран. Анализ этих коэффициентов в таблице 8, сразу очевидно, что Непал гораздо более консервативен, чем РФ и РТ, в отношении обоих зданий, рассматриваемых в исследовании. Также можно сделать вывод, что РФ и РТ 9% более консервативны в отношении дома, а РТ, с другой стороны, на 15% более консервативен в отношении школы.

3) Расчет сейсмической силы в основании сооружения и распределение сейсмических сил

В данном пункте рассчитываются и анализируются сейсмические силы в основании сооружения, распределение сейсмических сил по этажам и перераспределение нагрузки на отдельные стены и простенки. Выбран средний уровень землетрясения $РСН = 0,2 g$, при котором разрешено строительство зданий из природного камня в Непале и Таджикистане.

В таблицах 8А–8Г показаны коэффициенты формул для расчета «коэффициент уделения для зданий из природного камня» – сейсмической опасностью $0,2 g$ для дома и школы, соответственно (см. таблицы 8В–8Г).

Распределение сейсмической силы по этажам

Первым шагом является расчет определения сейсмической силы в основании сооружения для $0,2 g$ с использованием формул для каждой страны, приведенных в таблице 5, коэффициентов C_{RS} из таблицы 8 и сейсмических весов из таблицы 9. В результате получаются усилия, представленные в таблицах 9–10, подтверждающие, что Непал более консервативен в отношении общей силы в основании сооружения F_{base} . Непал принят за референтную страну, а процентная разница между другими странами показана в третьей колонке. Силы в основании сооружения вертикально распределяются по верхнему уровню (F_2) и уровню первого этажа (F_1) дома с использованием формулы распределения для Непала, приведенной в таблице 5. В РФ и РТ эта последовательность обратная: сначала рассчитываются горизонтальные сейсмические силы для каждого уровня этажа отдельно, с учетом коэффициента распределения по уровням η_{ik} , которые затем добавляются к общей силе в основании.

Комбинации нагрузок и вертикальные сейсмические нагрузки

Нормы Непала включают только одну комбинацию, которая является одинаковой как для определения сейсмического веса и сейсмической силы в основании сооружения, так и для проверки участков стен.

В РФ и РТ для особого сочетания нагрузок используются коэффициенты сочетаний, представленные в таблице 5.1 СП РФ и таблице 2, прил. 4 СНиП РТ соответственно. Помимо этого, согласно п. 6.14.3 СП РФ и п. 143 СНиП РТ при расчете каменных конструкций необходимо учитывать одновременное действие горизонтальных и вертикальных сейсмических сил, при этом значение вертикальной нагрузки при расчетной сейсмической силе 5–8 баллов должно быть 15% соответствующей вертикальной статической нагрузки. В нормах РФ вертикальная составляющая не учитывается в особом сочетании, отдельно от горизонтальной, что время как, согласно п. 27 СНиП РТ следует учитывать два различных сочетания: горизонтальные сейсмические нагрузки с коэффициентом сочетаний равным 1,0 и вертикальную сейсмическую нагрузку с коэффициентом сочетаний равным 0,5 и наоборот. Также следует учитывать то, что вертикальная составляющая может быть направлена в обоих направлениях – вверх и вниз.

Таблица 8 - Сравнение формул для определения силы в основании сооружения для домов и школы

Table 8 - Comparison of conceptual base shear formulas for houses and schools

А. Дом A. House				Уменьшение Reduction		Ответственность Importance	
Страна Country	PGA	Грунт Soil	Усиление Amplification	Структурный фактор Behavior factor		I_H	$C_{RS,H}^3$
Непал Nepal	Z	$A-C$	$C_h(T)$	$R_u \Omega_u$	2,0	$I=1,0$	1,88
РФ Russia	A	I	β_i	$1 / (K_1 K_\psi)$	$1 / (0,4 \cdot 1) = 2,5$	$K_0 = 1,0$	0,90 ¹
РТ Tajikistan	A		$\beta_i K_3$	$1 / (K_2 K_\psi)$	$1 / (1,45 \cdot 1) = 0,69$	$K_1 = 0,25$	0,82 ¹
Б. Школа B. School				Уменьшение Reduction		Ответственность Importance	
Страна Country	PGA	Грунт Soil	Усиление Amplification	Структурный фактор Behavior factor		I_H	$C_{RS,S}^3$
Непал Nepal		$A-C$	$C_h(T)$	$R_u \Omega_u$	2,0	$I=1,5$	1,88
РФ Russia	A	I	β_i	$1 / (K_1 K_\psi)$	$1 / (0,4 \cdot 1) = 2,5$	$K_0 = 1,1$	1,10 ¹
РТ Tajikistan	A	I	$\beta_i K_3$	$1 / (K_2 K_\psi)$	$1 / (1,45 \cdot 1) = 0,69$	$K_1 = 0,35$	1,27 ¹
В. Сравнение коэффициентов усиления силы в основании сооружения для дома C. Comparison of base shear coefficients for house design							
Страна Country	Формула Base shear formula		Значения для объекта исследования Values for case study house			Сила в основании сооружения Base shear = $C_{RS,tot}^{4 \cdot W}$	
Непал Nepal	$\frac{(Z \cdot C_h(T_1))}{(R_u \Omega_u)} \cdot I$		$Z=0,2; C_h(T)=2,5; R_u=2,0; I=1,0$			$V=0,25W_t$	
РФ Russia	$\frac{A \cdot \beta_i}{R} \cdot K_0 \cdot \eta_{ik}$		$A=0,2; \beta_i=2,5; R=2,5; K_0=1,0; \eta_{ik}=0,9$			$S_k=0,18m_k$	
РТ Tajikistan	$\frac{A \cdot \beta_i \cdot K_3}{R} \cdot K_1 \cdot \eta_{ik}$		$A=0,2; \beta_i K_3=2,5; R=0,69; K_1=0,25; \eta_{ik}=0,9$			$S_k=0,163Q_k$	
Г. Сравнение коэффициентов усиления силы в основании сооружения для школы D. Comparison of base shear coefficients for school design							
Страна Country	Формула Base shear formula		Значения для объекта исследования Values for case study school			Сила в основании сооружения Base shear = $C_{RS,tot}^{4 \cdot W}$	
Непал Nepal	$\frac{(Z \cdot C_h(T_1))}{(R_u \Omega_u)} \cdot I$		$Z=0,2; C_h(T)=2,5; R_u=2,0; I=1,5$			$V=0,375W_t$	
РФ Russia	$\frac{A \cdot \beta_i}{R} \cdot K_0 \cdot \eta_{ik}$		$A=0,2; \beta_i=2,5; R=2,5; K_0=1,1; \eta_{ik}=1,0^1$			$S_k=0,22m_k$	
РТ Tajikistan	$\frac{A \cdot \beta_i \cdot K_3}{R} \cdot K_1 \cdot \eta_{ik}$		$A=0,2; \beta_i K_3=2,5; R=0,69; K_1=0,35; \eta_{ik}=1,0^1$			$S_k=0,24Q_k$	

Примечания:

1. Значения η_{ik} равные 0,9 и 1,0 для здания дома и школы, соответственно.
2. Дальнейшие расчеты для школы будут выполняться для направления x с коэффициентом динамичности $\beta_x=2,5$.

3. C_{RS} – коэффициент усиления для зданий из кладки из природного камня, включающие в себя все коэффициенты, кроме γ_{2d} .

4. $C_{RS, tot}$ – коэффициент усиления для зданий из кладки из природного камня, включающие в себя все коэффициенты, для заданного значения PGA .

Также отметить, что у авторов настоящего исследования возникли разногласия в трактовке определения «статическая нагрузка». Один из авторов полагает что «статической» следует считать ту постоянную и временную нагрузку, которая непосредственно используется в особом сочетании нагрузок $(0,9DL + 0,5LL)$ – для РФ и $(0,9DL + 0,8LL)$ – для ГТ [2]. Другие авторы полагают, что подразумевается полная статическая нагрузка без учета коэффициентов преобразования и сочетаний $(1,0DL + 1,0LL)$. В настоящей работе рассматривается вариант полной статической нагрузки. Авторы считают целесообразным внести большую ясность в формулировку данного определения в будущих редакциях СП, чтобы избежать возможных разночтений и вновь призывают коллег поделиться своим мнением и комментариями по данному вопросу.

В настоящем исследовании рассматриваются 2 комбинации нагрузок для РФ и 4 для ГТ (см. таблицы 9–10). Следует отметить, что с учетом всех вышеизложенных разночтений количество комбинаций может быть существенно большим (8 для РФ и 16 для ГТ), однако в работе представлены только три примера для каждой страны, которые сравниваются с описанными различия. Для удобства сравнения различные символы для постоянной, временной и сейсмической нагрузок приняты одинаковыми (D , L и E – соответственно), и включены только верхний и нижний пределы.

Продольные и поперечные силы, изгибающие моменты

Распределение внутренних силовых факторов Q и M будет показано на примере простенков X_{1-4} для дома и Y_{1-1} для школы (см. рис. 3). Предполагается наихудший сценарий, при котором полностью игнорируются перемычки и подоконники, а также пренебрегается благоприятное воздействие горизонтальных поясов. Иными словами, предполагается анализ свободно стоящего консольного участка стены, что, в действительности, не является очень реалистичным сценарием, но даст достаточно наглядное представление о сейсмических требованиях, диктуемых нормами. Поскольку вся масса находится в стенах, вместо распределения сил игнорируются F_1 и F_2 по грузовой площади (для жестких диафрагм) силы перераспределяются пропорционально массам в соответствии с длиной основных стен в рассматриваемом направлении, плюс соответствующие длины стен в перпендикулярном направлении. Из-за несимметричности дома это приводит к распределению 45–55% для стен в направлении x , 32–36–32% в направлении y . Для школы распределение симметричнее: 50–50% и 21–29–29–21% соответственно.

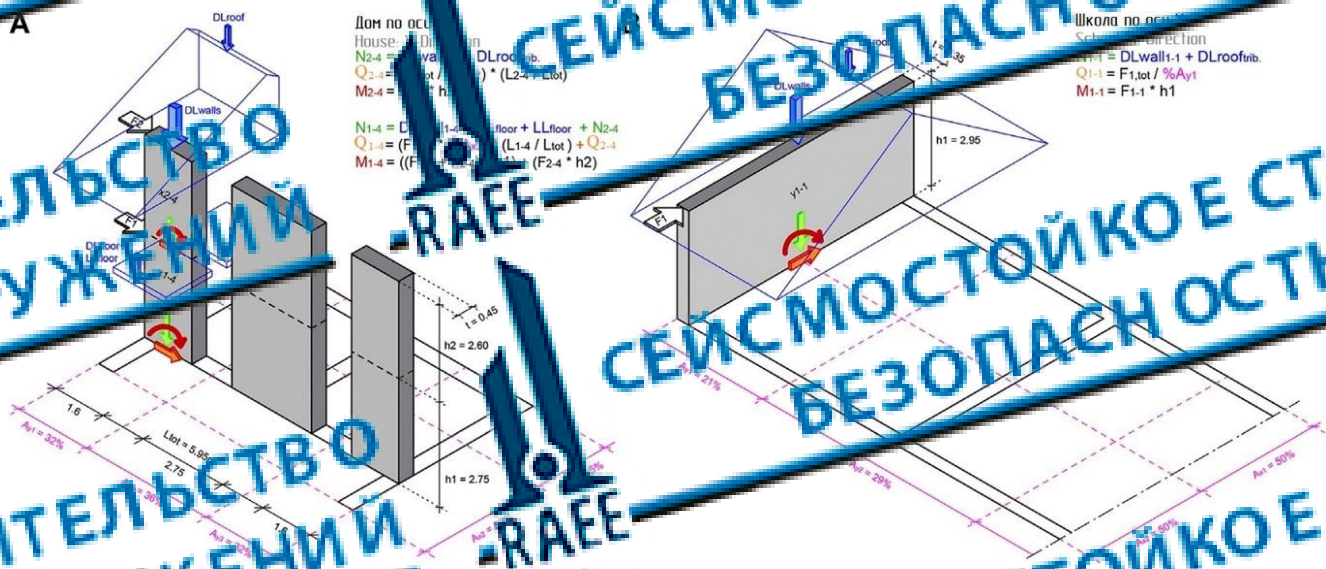


Рисунок 3 – Распределение массы и внутренних силовых факторов на консольный простенок для (А) дома и (В) проекта школы (с разрешения фонда Smart Shelter Foundation)

Figure 3 – Division of mass and internal action on a cantilevered pier for (A) the house and (B) the school design all by courtesy of Smart Shelter Foundation)

Расчетные значения для N , Q и M для критических комбинаций нагрузок представлены в таблицах 9–10. В первой строке каждой таблицы представлены результаты расчета для Непала, используемые в дальнейшем в качестве референсных значений. Ожидается, что более высокое значение M благоприятно для более жестких панелей, в то время как более низкие значения M могут быть благоприятны для изгибающему моменту для гибких панелей. Однако определение наиболее критических панелей может быть сделано только на последующих стадиях расчета во время полной проверки несущей способности. В целом, таблицы 9–10 показывают, что поперечная сила в основании сооружения (второй столбец) позволяет определить, какая страна является наиболее толерантной (РТ) и наиболее консервативной. В последних столбцах представлено процентное соотношение по сравнению с референсными значениями.

Таблица 9 – Сравнение сейсмических сил и внутренних силовых факторов для простенка дома X_{1-4}

Table 9 – Final calculations of base shear, story shear, and forces acting on selected masonry panel X_{1-4}

Страна Country	V_{base}	%	F_2	F_1	Критические комбинации Critical load combinations	N	Q	M	% N	% M
Непал Nepal	276,0	Реф.	136,1	140,0	$1,0DL + 0,3LL \pm 1,0E$	127,1	41,0	165,2	Реф.	Реф.
РФ Russia					$0,9DL + 0,5LL + 1,0E = 1,0(0,15N_{static})$					
1	204,9	-25,8	99,7	105,2	$1,05DL + 0,65LL \pm 1,0EL$	122,9	30,4	122,1	-26,1	-26,1
2	204,9	-25,8	99,7	105,2	$0,75DL + 0,35LL \pm 1,0EL$	81,3	30,4	122,1	-12,2	-26,1
3					(1) $1,0E_h + 0,5E_v$; (2) $0,5E_h + 1,0E_v$ $E_v = 0,15N_{static}$					
4	189,9	-31,2	90,9	99,0	$1,075DL + 1,075LL \pm 1,0E$	131,8	28,2	112,6	-55,7	-31,8
5	189,9	-31,2	90,9	99,0	$0,925DL + 0,925LL \pm 1,0E$	112,1	28,2	112,6	16,8	-31,8
6	189,9	-31,2	90,9	99,0	$1,1DL + 1,15LL \pm 0,5E$	141,0	14,1	56,3	45,2	-65,9
7	189,9	-31,2	90,9	99,0	$0,85DL + 0,85LL \pm 0,5E$	104,2	14,1	56,3	7,3	-65,9

Таблица 10 – Сравнение сейсмических сил и внутренних силовых факторов для проема школы Y_{1-1} Table 11 – Final calculations of base shear, story shear, and forces acting on selected masonry panel Y_{1-1} for the school

Страна Country	V_{base}	%	F_1	Критическая комбинация Critical load combinations	N	C	M	% $_N$	% $_M$
Непал Nepal	271,9	Ref.	271,9	$1,0DL \pm 1,0E$	172,4	56,6	166,	Ref.	Ref.
РФ Russia				$0,9DL + 1,0E \pm 1,0(0,5N_{static})$					
1	162,8	-40,1	162,8	$1,05DL \pm 1,0EL$	184,2	33,9	99,9	6,8	-40,1
2	162,8	-40,1	162,8	$1,075DL \pm 1,0EL$	131,6	33,9	99,9	-23,7	-40,1
РТ Tajikistan				(1) $1,0E_v \pm 0,75E_v$; (2) $0,9DL \pm 1,0E_v$ $E_v = 0,15N_{static}$					
1	187,8	-30,9	187,8	$1,075DL \pm 1,0E$	188,6	39,1	115,2	6,2	-30,9
2	187,8	-30,9	187,8	$0,9DL \pm 1,0E$	167,3	39,1	115,2	-5,8	-30,9
3	187,8	-30,9	187,8	$1,1DL \pm 0,5E$	201,8	19,5	57,6	11,1	-65,5
4	187,8	-30,9	187,8	$0,5DL \pm 0,5E$	149,1	19,5	57,6	-13,5	-65,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для зданий школы и дома построенных из неармированной кладки из природного камня в Непале, представлены расчеты полной сейсмической силы в основании сооружения, показано распределение внутренних силовых факторов и определены расчетные комбинации нагрузок для проверки по первому предельному состоянию с применением нормативных документов ФДР Непал, РФ и РТ. Получены следующие результаты:

Объекты исследования, которые характеризуются тяжелыми жесткими стенами и легкими гибкими перекрытиями ведут себя differently от обычных сооружений. Основное отличие заключается в том, что почти вся масса здания сосредоточена в стенах (соотношение стены/перекрытие – 97,5 и 2,5%), в результате чего сейсмические силы в уровне перекрытия распределяются между стенами пропорционально их массам.

В нормах РФ и РТ указывается, какую долю статической массы следует преобразовать в сейсмическую при построении расчетной динамической модели, в связи с чем в настоящем исследовании предложено понятие «коэффициента преобразования», а также определения метода двойного (МДП) и единичного (МЕП) приложения коэффициентов сочетаний. Для РФ применяется МДП с использованием коэффициентов сочетаний (0,9 – постоянная (DL) и 0,5 – временная кратковременная (LL) нагрузки). Для РТ применяется МДП с использованием коэффициентов 0,9 (DL) и 0,8 (LL).

Согласно традиционному подходу, принятому в нормах, сейсмическая масса концентрируется в уровнях перекрытия, отбрасывая полон первого (цокольного этажа), это означает что более 25% общей массы дома и около 30% школы не учитывается при определении сейсмических сил. Это может привести к некоторому занижению общей сейсмической силы в основании сооружения.

С другой стороны, некоторое завышение сейсмической силы происходит при использовании метода эквивалентной поперечной силы (EFL) и приближенном определении собственного периода колебаний (T_1).

EFL -метод не применяется в нормах РФ и РТ, однако для простых зданий (≤ 5 этажей и $T_1 < 0,4$) может использоваться упрощенный спектральный метод (S_{-modal}) с использованием только первой формы колебаний, который дает более низкие значения сейсмической силы в основании сооружения благодаря исключению части подалойной массы (в расчете участвует около 90% модальной массы).

– Таблицы 8А–8Г показывают, что нормы Непала гораздо более консервативны, чем нормы РФ и РТ для обоих исследуемых зданий. В свою очередь, нормы РФ на 9% более консервативны для дома, а нормы РТ, с другой стороны, на 11% более консервативны для школы.

– Значения сейсмической силы в основании сооружения по нормам РФ для дома оказались ниже референтных непальских на 25,8%. Значения силы по нормам РТ также ниже референтных на 31,2%.

– Значения сейсмической силы в основании сооружения по нормам РФ для школы также оказались ниже референтных непальских на 40,1%. Значения силы по нормам РТ также ниже референтных на 29,9%.

– В расчетных комбинациях нагрузок также учитывалась вертикальная составляющая сейсмической нагрузки, действующая в двух направлениях, равная 15% соответствующей вертикальной статической нагрузки. Упомянута возможность применения определения «статическая нагрузка»: 1 – нагрузка, которая непосредственно используется в полном сочетании нагрузок ($0,9DL + 0,5LL$ для РФ и $0,9DL + 0,8LL$ для РТ); 2 – полная статическая нагрузка без учета коэффициентов преобразования и сочетаний ($1,0DL + 1,0LL$). В настоящем исследовании рассматривается второй вариант с использованием полной статической нагрузки.

– При сравнении трех стран отмечают большие отклонения между расчетными значениями продольных и поперечных сил, и изгибающих моментов. При анализе каждой страны в статье также отмечают большие отклонения между минимальными и максимальными значениями для каждого набора комбинаций нагрузок. Однако наиболее критическая комбинация нагрузок может быть определена только во время проверки несущей способности.

Подводя итог, можно сказать, что системы «тяжелая кладка – плитное перекрытие» с ведут себя при сейсмическом воздействии иначе, чем большинство других несущих систем, например, каркасные здания с тяжелыми перекрытиями. Упомянутые наблюдения, приведенные в данной статье, применимость обычных методов в *ELF* и *S-Modal* для зданий с тяжелой кладкой вызывают некоторые сомнения. Расчетные предположки, представленные в работе, такие как исключение значительной части сейсмического веса и игнорирование кладки цоколя, должны быть тщательно оценены, а конкретные параметры для номинально армированной каменной кладки на цементном растворе, такие как коэффициент поведения, коэффициент армирования и собственный период колебаний, должны быть подтверждены. В дальнейшем необходимо проанализировать применимость различных расчетных методов, в частности, компьютерное моделирование, включая более тщательный анализ влияния горизонтального (и вертикального) армирования. После чего необходимо провести расчеты прочности кладки с учетом фактических свойств материалов.

Однако отмеченные в статье возможные разночтения и толкования отдельных положений нормативных документов РФ и РТ требуют совместной работы научного и инженерного сообществ над улучшением и расширением нормативной базы. В качестве рекомендации авторы предлагают использование различной терминологии для коэффициента преобразования и коэффициента сочетаний.

Очевидно, что важнейшей задачей является наличие четких определений и однозначное трактование положений норм. По этим причинам в рамках исследовательской инициативы *SMARTnet*, авторы приглашают экспертов, инженеров и ученых, поделиться своим мнением и опытом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jha A.S. Non-engineered construction in developing countries: A new approach toward earthquake risk reduction. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. 2000, Vol. 33 (3), pp. 187–208. DOI: 10.5459/bnzsee.33.3.187-208.
2. Schildkamp M., Silvestri S., Araki Y. Rubble Stone Masonry Buildings with Cement Mortar: Base Shear Seismic Demand Comparison for Selected Countries Worldwide. *Practices in Built Environment*. 2021. DOI: 10.3389/fbuil.2021.647815.

3. Schildkamp M., Araki Y. Cost Analysis of Mountain Schools in Nepal: Comparison of Earthquake Resistant Features in Rubble Stone Masonry vs. Concrete Block Masonry. *Frontiers in Built Environment*. 2019. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00055.
4. Schildkamp M., Silvestri S., Araki Y. Rubble Stone Masonry Buildings with Cement Mortar: Design Specifications in Seismic and Masonry Codes Worldwide. *Frontiers in Built Environment*. 2020. DOI: 10.3389/fbuil.2020.590520.
5. Schildkamp M., Araki Y. School Buildings in Rubble Stone Masonry with Cement Mortar in Seismic Areas: Literature Review of Seismic Codes, Technical Norms and Practical Manuals. *Frontiers in Built Environment*. 2019. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00013.
6. Абаев З.К., Кодзаев М.Ю., Валиев А.И. Оценка дефицита сейсмостойкости кирпичной дымовой трубы в соответствии с актуальными нормами проектирования // *Строительство и техногенная безопасность*. 2020. № 19 (7). С. 13–25. DOI: 10.37279/2413-1873.2020-19-13-25.
7. Официальный сайт Министерства культуры Российской Федерации. Сведения из Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации. URL: <https://opendata.mkrf.ru/opendata/7705851331-egrkn/>. Дата обращения: 24.11.2022.
8. Гольдштейн А.Ф. Средневековое зодчество Чечено-Ингушетии и Северной Осетии. Изд-во «Наука»: 1975. 157 с.
9. Гольдштейн А.Ф. Башни в горах. М.: Советский художник; 1977. 325 с.
10. Сумиленко С.Д. Башни Северного Кавказа и Адыгавказ: Проект. Изд-во: 1997. 150 с.
11. A Comparative Study of Seismic Isolation Codes Worldwide. In: Response Control and Seismic Isolation of Buildings. Routledge; 2006. pp. 41–74.
12. Sergio Hamponire De C Santo, Zanaica L., Burt C., Silvio S Lima.. Comparative Study of Codes for Seismic Design of Structures // *thematical Modelling in Civil Engineering*. 2013, Vol. 9, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.2478/mnce.2013-0001.
13. Ganaiji V., Telang D., Nair V. Comparative Study of Different Codes in Seismic Assessment. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015, Vol. 6, no. 2, pp. 137–138.
14. Ali M.U., Khan S.A., Anwar M.Y. Application of IS-CP-2007 and UB-97 in seismic vulnerability assessment of gravity designed RC buildings in Pakistan. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2017, pp. 396–405.
15. Zeynalov L., Polukhov I., Goralms M. Comparison of Azerbaijan and other seismic codes. *ERES 2013*, Vol. 132, pp. 205–217. DOI: 10.2495/ERES.30171.
16. Mousumi A., Imashi N., Tasumi A. A Comparative Study of the Seismic Provisions of Indian Seismic Code (Standard No. 2300) and International Building Code 2003 [Internet]. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. 2011, Vol. 12, pp. 1–12. URL: <https://www.researchgate.net/publication/232703221>.
17. Neupane P., Shrestha S. Comparative Analysis of Seismic Codes of Nepal and India for RC Buildings. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. Vol. 28 (2). 2015, pp. 102–105. DOI:10.14445/22315381/IJETT.V18I220.
18. Tamrakar A., Chet S. Comparison of the Seismic Design Code for Buildings of Nepal with the Chinese, European and American Seismic Design Codes. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/321122151>.
19. Chock G. Comparison of the USA, China and Japan Seismic Design Procedures [Internet]. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/296706982>.
20. Xiaoguang C., Jingshan B., You-wei S., Jianyi Z., Yudong Z. Comparison of Seismic Fortification Criterion for Eight Asian Countries. 2012.
21. Khose V.N., Singh Y., Lang D. A Comparative Study of Design Base Shear for RC Buildings in Selected Seismic Design Codes. *Earthquake Spectra*. 2012, Vol. 28, no. 3, pp. 1047–1070.
22. Shi G., Hu F., Shi Y. Comparison of seismic design for steel moment frames in Europe, the United States, Japan and China. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016, Vol. 127, pp. 41–53.

23. Vasconcelos G., Lourenço P.B. In-Plane Experimental Behavior of Stone Masonry Walls under Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering*. 2009, pp. 1269–1277.
24. Haziq D., Kiyotaka M. Afghanistan Building Codes (ABC): Focused on Comparative Analysis and the Viability of Enforcement. In: AEE 2017. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2017, pp. 138–149.
25. Babarmahal K. Nepal Housing Reconstruction Programme. Aswin. 2015.
26. Nakamura T., Derakhshan H., Magenes G., Griffith M.C. Influence of Diaphragm Flexibility on Seismic Response of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2017, pp. 955–960.
27. Code of Practice for Design Loads (other than Earthquake) for Buildings and Structures, Part 1: Dead Loads – Unit Weights of Building Materials and Other Materials (Second Revision). 9th Reprint 2010 (Including Amendment No.1), Reaffirmed 2018. New Delhi: Bureau of Indian Standards. 2018.
28. МСН 20-02-2013 Нагрузки и воздействия. МНТКС, 2013. 33 с.
29. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. М., 2016. 95 с.
30. Строительные нормы и правила Республики Таджикистан СНиП РТ 22-07-2018 «Сейсмостойкое строительство» / Комитет по архитектуре и строительству при Правительстве Республики Таджикистан. Душанбе: ГУП «НИИСА» Издательский центр», 2019. 48 с.
31. ГИИПромздание. Пособие по проектированию каркасных зданий для строительства в сейсмических районах (к СНиП II-7-81). М.: Стройизда. 1985. 292 с.
32. Николаев И.И. Проектирование железобетонных конструкций зданий для строительства в сейсмических районах. Ташкент: Укитувчи. 1999. 232 с.
33. Форум «DWG». URL: <https://forum.dwg.ru/showthread.php?t=95402> дата обращения: 24.11.2022.
34. Официальный сайт ООО «Лира сервис» URL: <http://liira.ru/kb/107/656/>. Дата обращения: 24.11.2022.
35. EN 1991-1-3 (2003) (English). Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads. Author: The European Union Per Regulation 30/2011, Directive 98/34/EC 2018.
36. Fardis M., Carvalho E., Elnashai A., Faccioli E., Pinto P., Plummer A., et al. Designers' Guide to EN 1998-1 and 1998-5. Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistant Structures. [Internet]. Designers' Guide to Eurocodes. Thomas Telford Publishing; 2001. Available from: <https://doi.org/10.1680/dgte8.33481>.
37. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. Научное издание. М.: Издательство АСВ. 2010. 384 с.
38. Villaverde A. Fundamental Concepts of Earthquake Engineering. CRC Press. 2009. 960 p.
39. Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. Displacement Based Seismic Design of Structures. 721 p.
40. Charleson A. Seismic Design for Architects. Routledge. 2011. 296 p.
41. Брагилев М.Ф., Городачев Н.М., Блюмин Л.Х. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Б.Г. Корнев, editor. М.: Стройизда. 1981. 115 с.
42. Elmenshawi A., Sorour M., Mufti A., Jaeger I.G., Shriv N. Damping mechanisms and damping ratios in vibrating unreinforced stone masonry. *Engineering Structures*. 2010, pp. 3269–3278.
43. Tomažević M., Lutman M. Heritage Masonry Buildings in Urban Settlements and the Requirements of Eurocodes: Experience of Slovenia. *International Journal of Architectural Heritage*. 2007, pp. 108–130.
44. СП 14.13.30.2018 «СНиП II-7-81. Строительство в сейсмических районах». М., 2018.
45. NBC 202.2015. Guidelines on load bearing masonry. Kathmanu: Department of Urban Development and Building Construction. 2015.

REFERENCES

1. Arya A. S. Non-engineered construction in developing countries: An approach towards earthquake risk reduction. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. 2000, vol 33 (3), pp. 187–208. DOI: 10.5459/bnzsee.33.3.187-208.

2. Schildkamp M., Silvestri S., Araki Y. Rubble Stone Masonry Buildings with Cement Mortar: Base Shear Seismic Demand Comparison for Selected Countries Worldwide. *Frontiers in Built Environment*. 2021. DOI: 10.3389/fbuil.2021.647815.
3. Schildkamp M., Araki Y. Cost Analysis of Mountain Schools in Nepal: Comparison of Earthquake Resistant Features in Rubble Stone Masonry vs. Concrete Block Masonry. *Frontiers in Built Environment*. 2019. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00055.
4. Schildkamp M., Silvestri S., Araki Y. Rubble Stone Masonry Buildings with Cement Mortar: Design Specifications in Seismic and Masonry Codes Worldwide. *Frontiers in Built Environment*. 2020. DOI: 10.3389/fbuil.2020.590520.
5. Schildkamp M., Araki Y. School Buildings in Rubble Stone Masonry with Cement Mortar in Seismic Areas: Literature Review of Seismic Codes, Technical Norms and Practical Manuals. *Frontiers in Built Environment*. 2019. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00013.
6. Abaev Z., Kodzaev M., Valiev A. Assessment of the Seismic Resistance Deficit of Brick Masonry Chimney According to Relevant Design Codes. *Construction and industrial safety*. 2020, no 19 (7), pp. 13–25. DOI: 10.37279/2413-1073-2020-19-7-13-25 (In Russian).
7. Ministry of Culture of the Russian Federation. State Register of Cultural Heritage Objects (Monuments of History and Culture) of the Peoples of the Russian Federation. [Internet]. Available from: <https://opendata.mkrf.ru/opendata/7705851331-eg-on/>. (Accessed: 24.11.2022).
8. Gol'dshteyn A.F. Medieval architecture in the Chechen-Ingush and North Ossetia Republics. Publishing house Science. 1975. 157 p. (In Russian). (In Russian).
9. Gol'dshteyn A.F. Towers in the mountains. Soviet artist. 1977. 335 p. (In Russian).
10. Sumilenko S.D. North Caucasian Towers. Pioneer Press. 1997. 150 p. (In Russian).
11. Feng D. A Comparative Study of Seismic Isolation Codes Worldwide. In: *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*. Routledge, 2006. pp. 47–14.
12. Sergio Hampshire De C Santos, Zanaica L., Bucur C., Silvio S Lima. Comparative Study of Codes for Seismic Design of Structures. *Mathematical Modelling in Civil Engineering* 2013, Vol. 9, no. 1-2013, pp. 1–12. DOI: 10.2478/mmce-2013-0001
13. Dhanvijay V., Telang D., Nair V. Comparative Study of Different Codes in Seismic Assessment. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015, Vol. 6, no. 2, pp. 1371–1381.
14. Ali M.U., Khan S.A., Anyar M.Y. Application of IS:800-2007 and IS:97 in seismic vulnerability assessment of gravity designed RC building in Pakistan. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2017, pp. 336–405.
15. Zeynalov L., Polukhov V., Goralıç M. Comparison of Azerbaijan and other seismic codes. *ERES* 2013. 2013, Vol. 132, pp. 205–217. DOI: 10.2495/ERES130171.
16. Masumi A., Inashi N., Masumi A. A Comparative Study of the Seismic Provisions of Iranian Seismic Code (Standard No. 2800) and International Building Code 2001. [Internet]. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. 2011, Vol. 12. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/231703221>.
17. Neupane P., Shrestha S. Comparative Analysis of Seismic Codes of Nepal and India for RC Buildings. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2015, Vol. 28 (2), pp. 102–105. DOI:10.14445/2231381/IJETT-V28P120.
18. Tamralal A., Chen S. Comparison of the Seismic Design Code for Buildings of Nepal with the Chinese, European and American Seismic Design Codes. *The Thirtieth KKHTC/N Symposium on Civil Engineering*. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/321133131>
19. Chock G. Comparison of the USA, China and Japan Seismic Design Procedures [Internet]. *Civil Engineering Conference in the Asia Region CECAP-7*. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/296706982>.
20. Xiaoguang C., Jingshan B., Youwei S., Jianyi Z., Yidong Z. Comparison of Seismic Fortification Criterion of Eight Asian Countries. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. 2012.

21. Khose V., Singh Y., Lang D. A comparative study of Design Base Shear for RC Buildings in Selected Seismic Design Codes. *Earthquake Spectra*. 2012, Vol. 28, no 3, pp. 1047–1070.
22. Shi G., Hu F., Shi Y. Comparison of seismic design for steel moment frames in Europe, the United States, Japan and China. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016, Vol. 127, pp. 41–53.
23. Vasconcelos G., Lourenço P.B. In-plane Experimental Behavior of Stone Masonry Walls under Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering*. 2009, pp. 1269–1277.
24. Hazig D., Kiyosaka M. Afghanistan Building Codes (ABC): Focused on Comparative Analysis and the Viability of Enforcement. *AEI 2017*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2017, pp. 138–149.
25. Baburmanal K. Nepal Housing Reconstruction Programme. Awin. 2015.
26. Nakamura Y., Derakhshan H., Magees E., Griffith M.C. Influence of Diaphragm Flexibility on Seismic Response of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2017, pp. 935–960.
27. Code of Practice for Design Loads (other than Earthquake) for Buildings and Structures, Part 1 Dead Loads – Unit Weights of Building Materials and Stored Materials (Second Revision), 9th Reprint 2010 (Including Amendment No.1). Reaffirmed 2015. New Delhi: Bureau of Indian Standards. 2018.
28. MSN 20-02-2013 Loads and impacts. M., 2013. 33 p. (In Russian).
29. SP 20.133.30.2016 Loads and impacts. M., 2016. 95 p. (In Russian).
30. SNiP II-7-81* 22-07-2018 / Committee for Architecture and Construction under the Government of the Republic of Tajikistan. GUP «NIISA» Izdatel'skiy centr». Dushanbe. 2019. 48 p.
31. CSRIIB. Manual for the design of frame industrial buildings for construction in seismic areas (to SNiP II-7-81). M.: Stroyizdat. 1985. 292 p. (In Russian).
32. Nikolaev I.I. Design of RC structures for seismic areas. Tashkent, Ukit'strem. 1990. 232 p. (In Russian).
33. Forum «DWG» [Internet]. Available from: <https://forum.dwg.ru/showthread.php?t=95403>. (Accessed: 24.11.2022).
34. Lira service. Structural analysis software. Available from: <https://rflira.ru/kb/107/656/>. (Accessed: 24.11.2022).
35. EN 199-1-3 (2002) (English): Eurocode 1: Action on structures - Part 1-3. General action - snow loads. Authority: The European Union Per Regulation (EC) 2001, Directive 98/34/EC 2018.
36. Fardis M., Carvalho E., Elnashai A., Faccioli E., Pili P., Plumier A., et al. Designers' Guide to EN 1998-1 and 1998-5. Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistant Structures [Internet]. *Designers' Guide to Eurocodes*. Thomas Telford Publishing. 2005. 1. Available from: <https://doi.org/10.1680/jcge.8.3481>.
37. Raiser V.D. Structural reliability theory. M.: Izdatel'stvo ACB. 2010. 384 p. (In Russian).
38. Faverde R. Fundamentals Concepts of Earthquake Engineering. CRC Press. 2009, 960 p.
39. Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. Displacement Based Seismic Design of Structures. IUSS Press. 721 p.
40. Charleson A. Seismic Design for Architects. Routledge. 2000. 296 p.
41. Prashteyn M.F., Borodachev N.M., Bluemin I.H. Dynamic analysis of structures for special efforts. M.: Stroyizdat. 1981. 215 p. (In Russian).
42. Elmenhawy A., Sorour M., Multi Jaeger LG, Shrive N. Damping mechanisms and damping ratios in vibrating unreinforced stone masonry. *Engineering Structures*. 2010, pp. 3269–3278.
43. Tomaževič M., Litman M. Heritage Masonry Buildings in Urban Settlements and the Requirements of Eurocodes. Experience of Slovenia. *International Journal of Architectural Heritage*. 2007, pp. 188–30.
44. SP 14.13330.2013 «SNiP II-7-81* Earthquake construction». M., 2018. (In Russian).
45. NBC 202-2015. Guidelines on: load bearing masonry. Kathmandu: Department of Urban Development and Building Construction. 2015.

Сведения об авторах/ Information about the authors

Заурбек Камболтазиз Абаев, к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический институт)

университет)», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)», 362021, Республика Северная Осетия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44; РИНЦ ID: 756761, Scopus ID: 57194205721; zaurbek_a@yahoo.com.

Zaurbek K. Abaev, Ph.D., Associate Professor, Department of Civil Engineering; North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), NCIMM (STU); 362021, Republic of North Ossetia - Alania, Vladikavkaz, Nikolaev st. 44; RISC ID: 756761, Scopus ID: 57194205721; zaurbek_a@yahoo.com.

Martijn Schildkamp, Ph.D., директор, некоммерческая организация «Smart Shelter Foundation» (SSF); 2403 VT, Нидерланды, г. Алphen aan de Rijn, Distelstraat 5; Scopus ID: 57207859724; smartshelterresearch@gmail.com.

Martijn Schildkamp, Ph.D.; director non-profit organization «Smart Shelter Foundation» (SSF); Scopus ID: 57207859724; smartshelterresearch@gmail.com.

Азамат Дзониевич Валиев, аспирант; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»; 362021, Республика Северная Осетия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44; РИНЦ ID: 1124556; azamat99valiev@gmail.com.

Azamat Valiev, Ph.D student; Department of Civil Engineering; North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), NCIMM (STU); 2403 VT, The Netherlands, Alphen aan den Rijn, Distelstraat 5; 362021, Republic of North Ossetia - Alania, Vladikavkaz, Nikolaeva st. 44; RISC ID: 1124556; azamat99valiev@gmail.com.

Вклад авторов:

Шилдкамп М. – основная идея, сбор и обработка материала, проведение расчетов, координация исследования, верификация результатов, подготовка структуры статьи и научное редактирование текста.

Абаев З.К. – разработка предложений по работе с нормами РФ и РТ, проведение расчетов, верификация результатов, научное редактирование статьи.

Валиев А.Д. – проведение расчетов, подготовка текста статьи.

Автор, ответственный за переписку: Валиев Азамат Дзониевич, azamat99valiev@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors:

Schildkamp M. – main idea, collection and processing of material, calculations, coordination of the research, verification of results, preparation of the structure of the article and scientific editing of the text.

Abaev Z. K. – development of proposals for work with the norms of the Russian Federation and Tajikistan, calculations, verification of results, scientific editing of the text of the article.

Valiev A. D. – calculations, preparing the text of the article.

Corresponding author: Azamat Valiev, azamat99valiev@gmail.com

The authors declare the absence of a conflict of interest.

УДК 699.8

DOI [10.37153/2618-9283-2022-6-46-54](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-46-54)

Теоретические и экспериментальные исследования

Исследование надежности железобетонных резервуаров для хранения чистой воды в условиях высокой сейсмичности региона

Сангинов Абдусамад Мирвафоевич¹

¹ Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ.
Душанбе, Республика Таджикистан

Аннотация: В работе приведены результаты исследования прочности, несущей способности, надежности конструктивных элементов двух железобетонных резервуаров для хранения чистой воды ёмкостью по 750 м³ каждый, которые расположены в махалле Ховарон города Душанбе и даны рекомендации о возможности использования сооружений по назначению. Следует отметить, что город Душанбе расположен в 9-балльной зоне сейсмичности согласно картам общего сейсмического районирования Республики Таджикистан.

Ключевые слова: элемент несущих конструкций, прочность, надежность, сейсмостойкость, сейсмическое воздействие, собственные колебания, жесткость, прочность, безопасная эксплуатация

Для цитирования: Сангинов А.М. Исследование надежности железобетонных резервуаров для хранения чистой воды в условиях высокой сейсмичности региона // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 6. С. 46-54.
DOI: [10.37153/2618-9283-2022-6-46-54](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-46-54)

Theoretical and experimental studies

Investigation of the reliability of reinforced concrete tanks for storing clean water in conditions of high seismicity of region

Abdusamad M. Sanginov¹

Geological Institute, Seismic engineering, construction and Seismological NANT.
Dushanbe, Republic of Tajikistan

Abstract: The paper presents the results of a study of the strength, non-viability, reliability of structural elements of two reinforced concrete tanks for storing clean water with a capacity of 750 m³ each, which are located in the Khowaron mahalla of the city of Dushanbe, and recommendations are given on the possibility of using the structures for their intended purpose. It should be noted that the city of Dushanbe is located in a 9-point seismicity zone according to the maps of the general seismic zoning of the Republic of Tajikistan.

Keywords: elements of load-bearing structures, strength, reliability, seismic resistance, seismic impact, natural vibrations, rigidity, strength safe operation

@ A.M. Sanginov, 2022

For citation: Abdusamad M. Sanginov. Investigation of the reliability of reinforced concrete tanks for storing clean water in conditions of high seismicity of region. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 6, pp. 46–54 (In Russian). DOI: [10.37153/2618-9283.2022.6-46-54](https://doi.org/10.37153/2618-9283.2022.6-46-54)

Необходимость в проведении комплексного обследования двух железобетонных резервуаров для хранения чистой воды емкостью 750 м³ каждый, которые расположены в микрорайоне Коварон города Душанбе, была связана с оценкой прочности и надежности основных несущих конструкций сооружения, построенного в 80-х годах прошлого столетия (долгие годы (с начала 1990-х годов) не использовавшегося).

Резервуары объемом 750 м³ каждый, предназначенные для сбора и хранения питьевой воды, были спроектированы и построены по типовому проекту 901-4-79с.84 для строительства в районах сейсмичностью 7, 8, 9 баллов [1].

Исследуемые резервуары имеют в плане прямоугольное очертание размером 18 x 12 м каждый, высотой 4,64 м. Между ними имеется водораспределительный участок прямоугольной формы размером 5,5 x 4,0 м, высотой 5,64 м (рис. 1).

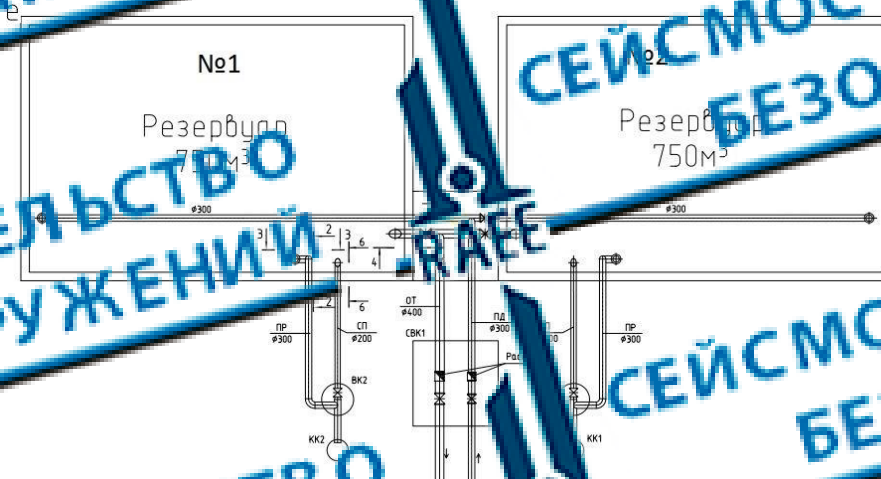


Рисунок 1 – Схема исследуемого объекта

Figure 1 – Scheme of the object under study

Методика обследования сооружения включала: изучение имеющейся проектно-технической документации, визуальное обследование несущих и самонесущих конструкций сооружения (сбор информации о характере, объеме и местонахождении обнаруженных дефектов, повреждений конструкций, их фотосъемка и т.д.); обследование прилегающей территории; определение прочностных характеристик бетона несущих конструкций инструментальным методом; выявление расположения и диаметра арматуры конструкций с помощью металлодетектора; выявление дефектов и несплошностей в существующих конструкциях и анализ их влияния на сооружения; анализ характера имеющихся дефектов, повреждений и причин их возникновения; выполнение поверочных расчетов.

При визуальном обследовании несущих железобетонных конструкций резервуара видимых повреждений в виде трещин не обнаружено. Основным, выявленными дефектами на поверхности большинства конструкций: следы увлажнения, сопровождающиеся высолом. Гидроизоляция на стенах частично отсутствует, в некоторых местах гидроизоляция отшелушившаяся [2–3].

Негативное влияние на состояние конструкций оказало также то, что не было наблюдения за сооружениями более 30 лет. Как следствие, конструкции подвергались

постоянному воздействию атмосферных осадков в течение длительного времени, приведшему к коррозии бетона, представленной в виде выщелывания поверхности конструкций и отслоения защитного слоя бетона и арматуры.

Инструментальные исследования прочности бетона несущих конструкций здания проводились неразрушающими методами контроля согласно ГОСТ 22690-88 «Бетон тяжёлый». Определение прочности бетона выполнено двумя типами приборов – эталонным пружинным молотком «Schmidt Hammer N/L» и молотком ОМШ. Для определения толщины защитного слоя, количества и диаметра арматуры в бетоне был использован прибор Rebar Locator PRCS-EEQ «PROFOMETR 5+» [7–9].

В результате инструментального исследования стен резервуара было установлено, что среднее значение прочности бетона в испытываемых зонах железобетонных конструкций в большинстве случаев соответствует проектным значениям. Армирование конструкций соответствует рабочему проекту.

Оценка напряженно-деформированного состояния несущих конструкций и определение расчетной прочности конструкций выполнялись с помощью комплексной компьютерной программы ЛИРА-САПР-13, разработанной на основе метода конечных элементов МКЭ. Расчеты были выполнены на основные и особые нагрузки с учетом сейсмических нагрузок. Расчетная сейсмичность – более 9 баллов, категория грунта – 2-я.

В качестве основных нагрузок выступают собственный вес элементов сооружения (бокового давления, оказываемого на стенку резервуара засыпкой грунта, гидроизоляционного слоя, строительных элементов, постоянной нагрузки от веса конструкции кровли и грунтов, используемых для покрытий кровли), длительные и временные кратковременные воздействия по п. 3 СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия»). Действие расчетных сейсмических нагрузок принято в трех ортогональных направлениях по основным осям здания (два горизонтальных и одно вертикальное [4–6,10].

Связь с основанием рассчитана в соответствии со СНиП 2.02.05-87 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками», моделировалась одноступенчатой и конечными элементами, имеющими одинаковые жесткости в обоих направлениях, принято в модели 600 тс/м.

Результаты расчета несущих конструкций, полученные при проведении проверочного расчета, представлены ниже в таблическом виде (рис. 2–11).

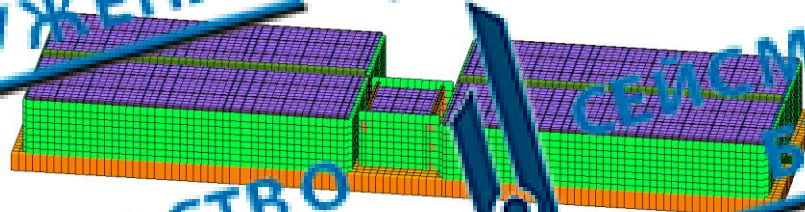


Рисунок 2 – Вид трехмерной модели в программе ЛИРА-САПР 13

Figure 2 – View of a three-dimensional model in the LIRA-SAPR 13 program

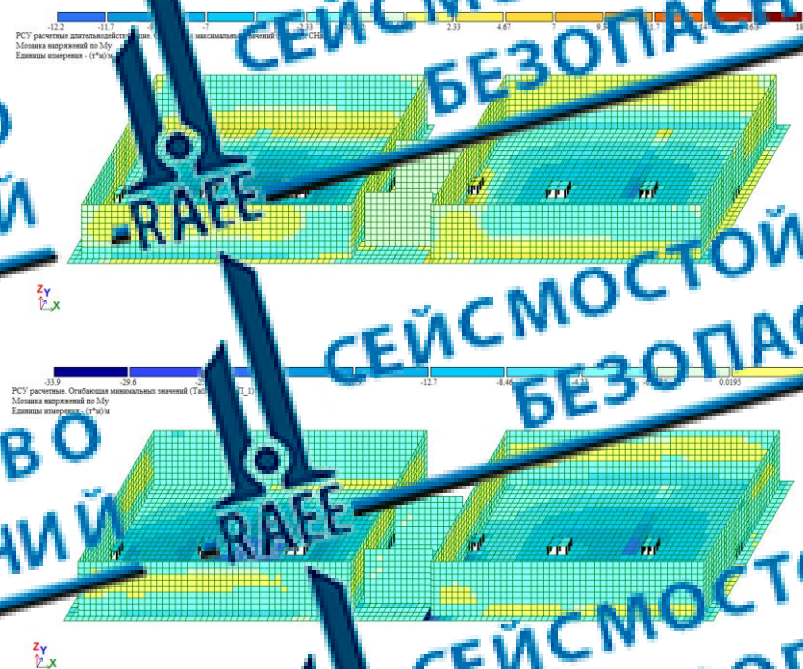


Рисунок 3 – Максимальная и минимальная изгибающих моментов M_y в стенах резервуаров

Figure 3 – Maximum and minimum of bending moments of M_y in the walls of tanks

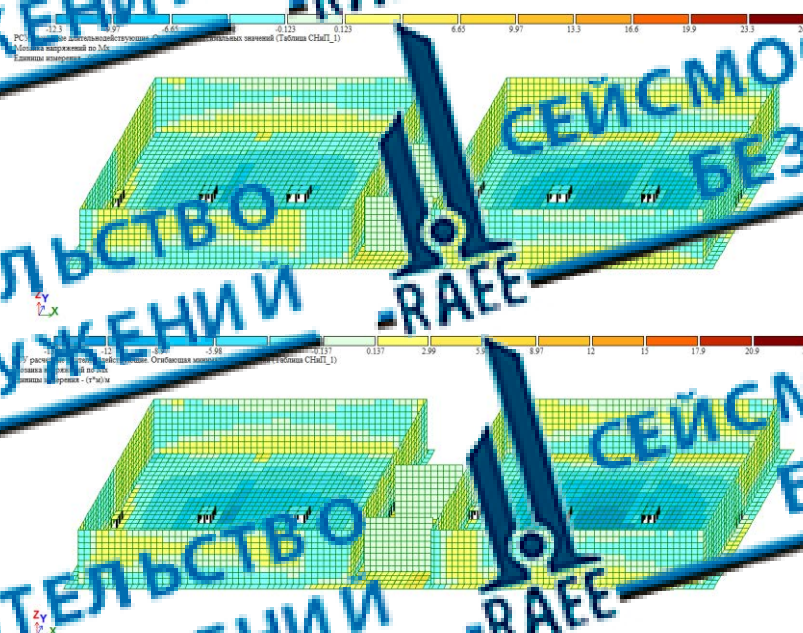


Рисунок 4 – Максимальная и минимальная изгибающих моментов M_x в стенах резервуаров

Figure 4 – Maximum and minimum of bending moments of M_x in the walls of tanks

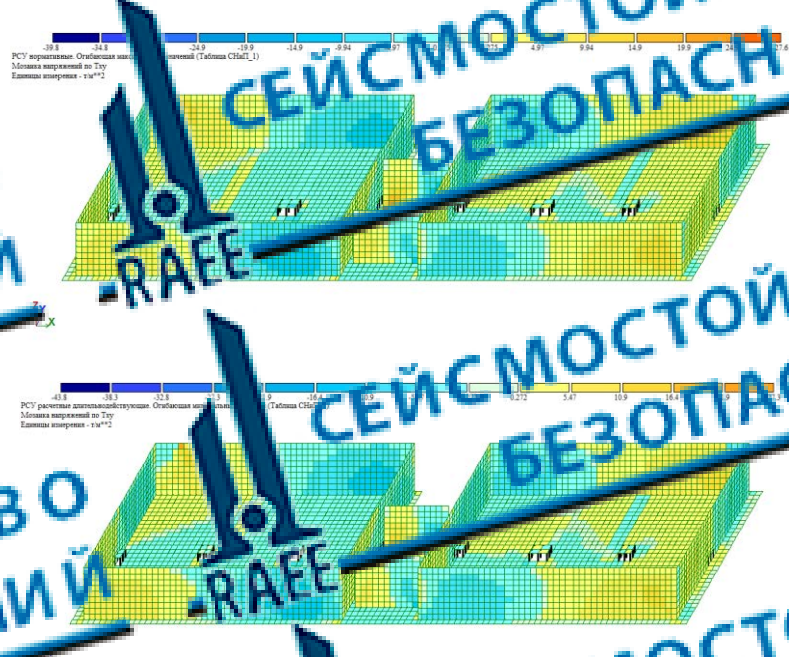


Рисунок 5 – Изополюсы напряжений τ_{xy} в стенах резервуара

Figure 5 – Isosurfaces of stress τ_{xy} in the walls of tanks

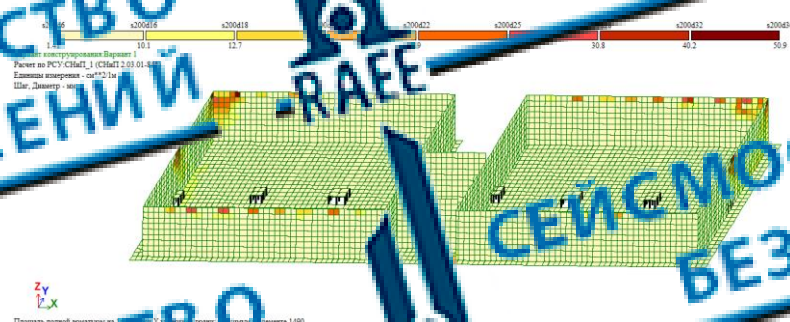


Рисунок 6 – Расчетная площадь армирования стены резервуара по оси Y

Figure 6 – Estimated reinforcement area of the tank wall along the Y axis

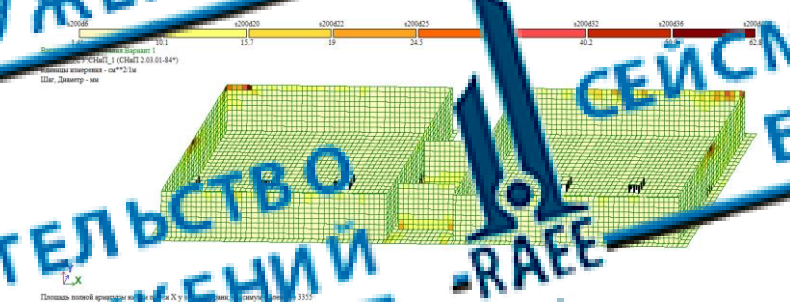


Рисунок 7 – Расчетная площадь армирования стены резервуара по оси X

Figure 7 – Estimated reinforcement area of the tank wall along the X axis



Рисунок 8 – Расчетная площадь армирования колонн

Figure 8 – Estimated column reinforcement area

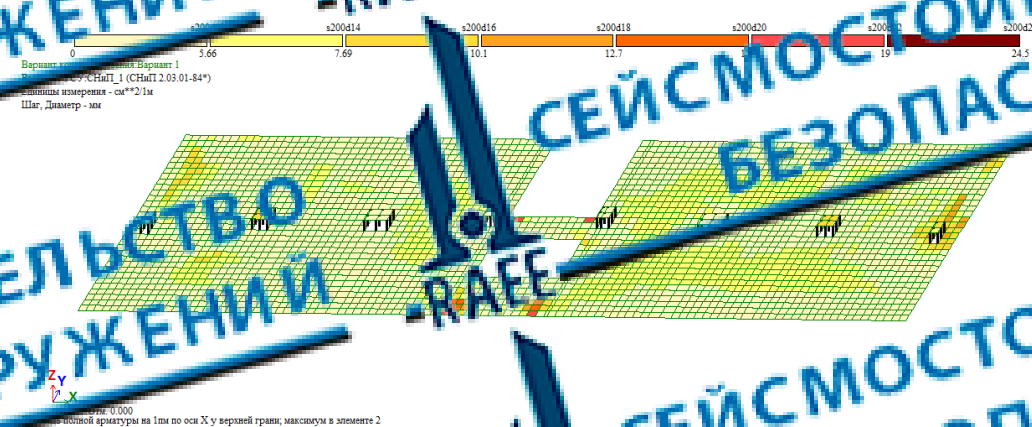


Рисунок 9 – Расчетная площадь армирования фундаментной плиты по оси X

Figure 9 – Estimated reinforcement area of the foundation plate along the X axis



Рисунок 10 – Расчетная площадь армирования фундаментной плиты по оси X

Figure 10 – Estimated reinforcement area of the foundation plate along the X axis

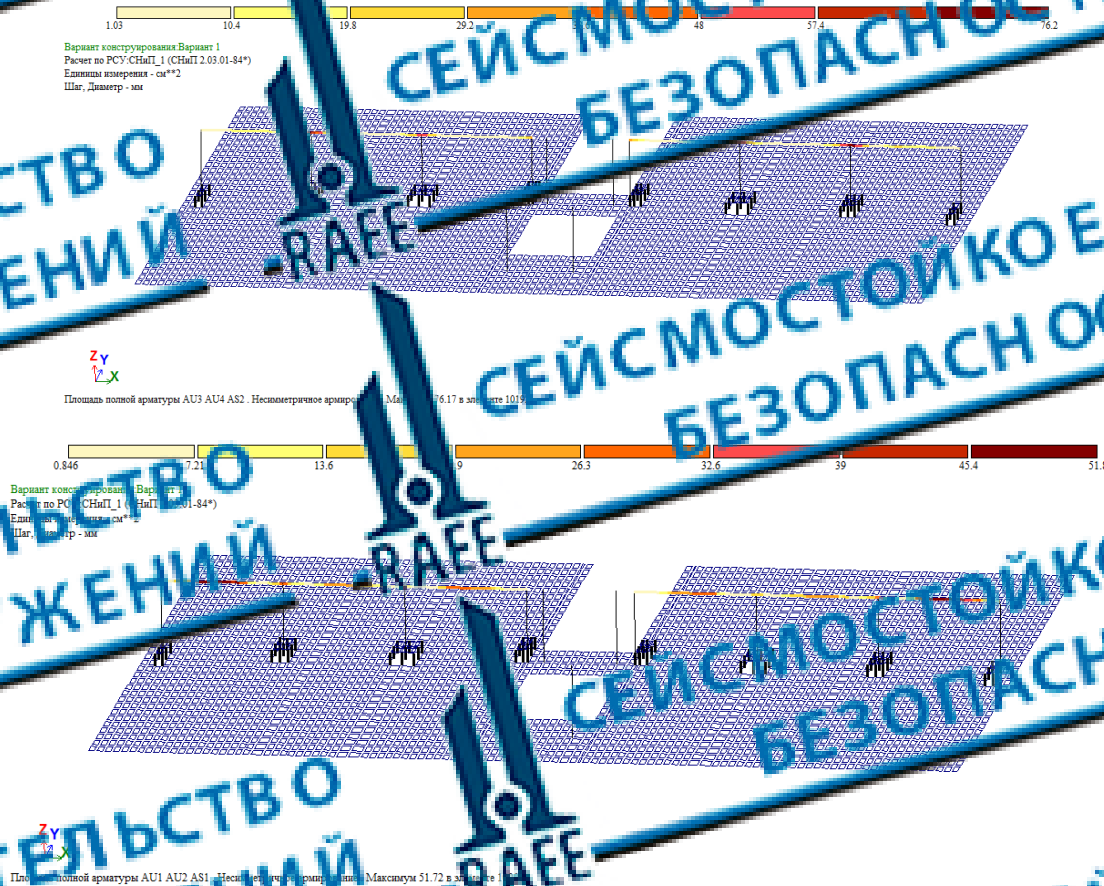


Рисунок 11 – Общая расчетная площадь армирования балок (верхних и нижних)

Figure 11 – Total estimated area of reinforcement of beams (upper and lower)

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании результатов проведенного комплексного обследования, анализа проектных материалов и результатов проектного расчета, были сделаны следующие выводы:

1. Резервуары, предназначенные для хранения питьевой воды, были разработаны и построены по типовому проекту 901-4-79п.84 для строительства сейсмоопасных зон. Исключением из проекта является то, что в резервуаре № 2 место опирания балок на колонну по оси 2 показывает неполное опирание на колонну.

2. Местонахождение здания – на участке с сложным глинистым просадочными грунтами. По проявлению просадочных свойств глинистые грунты основания здания относятся ко II му типу по просадочности. Сейсмическая активность участка, согласно действующей карте сейсмического микрорайонирования территории г. Душанбе, составляет 9 баллов по шкале МСК.

3. По результатам исследования техническое состояние железобетонных конструкций обоих резервуаров находится в удовлетворительном состоянии. Частичное повреждение в месте опирания балок с колонной по оси 2 проявляется в неполном опирании на колонну, а дефекты, обнаруженные в железобетонных конструкциях, в том числе отколовшаяся штукатурка и коррозия арматурной сетки, в свою очередь не снижают несущей способности и свидетельствуют о возможности проведения восстановительных работ по использованию обоих резервуаров [11–12].

4. Основной причиной появления возникших дефектов несущих конструкций объекта является многолетнее (более 30 лет) бесконтрольное и неэксплуатируемое состояние объектов, а также подпитание атмосферных вод вокруг вводов, отсутствие необходимого уклона вдоль проезжей части.

5. Одной из причин возникновения дефектов является износ гидроизоляционного слоя стен, что в процессе эксплуатации резервуаров может привести к просачиванию воды внутрь резервуаров. На возможность размещения фильтрационной пробы указывают наличие пятен влаги на поверхности железобетонных конструкций и панельных стен.

6. По результатам инструментальных и следственных резервуаров было установлено, что среднее значение прочности бетона в испытываемых зонах железобетонных конструкций в большинстве случаев соответствует проектным нормам и имеется возможность их использования после реконструкции. Армирование конструкций должно выполняться согласно рабочему проекту.

По результатам расчетов программного комплекса ЛИРА-САПР 2013 с учетом данных обследования, в т.ч. установленных прочностных параметров бетона и армирования, железобетонных несущих конструкций сооружения достаточно для восприятия расчетных нагрузок.

На основании вышеизложенного анализа, в целях обеспечения планового восстановления объекта и его дальнейшего стабильного использования, РЕКОМЕНДУЕТСЯ разработать проект усиления и восстановления с учетом требований действующих строительных норм, в котором следует предусмотреть:

- в резервуаре № 2 необходимо зачистить опалубку в месте опирания балок с колонной по оси 2 бетоном класса не ниже В35. Перед бетонированием механическими щетками должна быть очищена ржавчины стальная арматура;

- на участках всплывшего грунта наблюдается проседание грунта, поэтому следует провести комплекс защитных мероприятий от просачивания воды путем засыпки всплывшим грунтом с трамбовкой грунта в соответствии с действующими нормативными требованиями;

- необходимо провести полную очистку проржавевших бетонных поверхностей колонн и стен и швов между панельными стенами путем обработки гидроизоляционным материалом «Пен-трэн» или другим подобным [13-14];

- необходима замена всех водопроводных труб, стоков, вентиляционного оборудования.

По завершении восстановления и капитального ремонта объекта в обязательном порядке требуется проведение гидравлического испытания объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Типовой проект 901-4-79с.84 Резервуары для воды прямоугольные сборные емкостью 50–10000 м³ для сейсмических районов.
2. Рекомендации по проектированию гидроизоляции подземных частей зданий и сооружений. ЦНИИПромзданий. Москва. 1996.
3. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. Москва. 1988.
4. МКС ЧТ 22-07-2018 Сейсмостойкое строительство. Душанбе. 2018.
5. МКС ЧТ 50-01-2007 Основания зданий и сооружений. Нормы проектирования. Душанбе. 2008.
6. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Москва. 1984.
7. ГОСТ 22590.0-77 «Бетон тяжёлый. Общие требования к методам определения прочности без разрушения приборами механического действия». М. 1977.

8. ГОСТ 22690-88 «Бетон тяжелый. Методы определения прочности без разрушения приборами механического действия». М. 1989.
9. Краткий справочник «Неразрушающий контроль в строительстве». Вена. 2010.
10. СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия». М. 1989.
11. Москвин В.М., Алексеев С.Н., Вербицкий Г.П., Новгородский В.И. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры. М. 1971.
12. Допуски при производстве строительно-монтажных и специальных работ. Киев. 1970.
13. Гидроизоляция бетонных конструкций. Технологический регламент на применение гидроизоляционных материалов проникающего действия системы ПЕНЕТРОН. Москва. 2004.
14. Технологический регламент на выполнение работ по гидроизоляции и антикоррозионной защите монолитных и сборных бетонных и железобетонных конструкций. Москва. 2017.

REFERENCES

1. Ilpovoy proekt 901-4-79s.84 Rezervuary dlya vody pryamougolnye sbornye emkost' 50-10000 m³ dlya seismicheskikh rajonov.
2. Rekomendacii po proektirovaniyu gidroizolyacii podzemnykh chastej zdaniy i sooruzhenij. CNIIPromzdaniy. Moskva. 1996.
3. Rekomendacii po obsledovaniyu i ocnke tekhnicheskogo sostoyaniya krupnopanel'nykh i kamennykh zdaniy. Moskva. 1988.
4. MKS CHT 22-07-2018 Sejsmostoykoe stroitel'stvo. Dushanbe. 2018.
5. MKS CHT 50-01-2001 Osnovaniya, kazny i sooruzheniy. Normy proektirovaniya. Dushanbe. 2008.
6. SNiP 2.03.01-84. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Moskva. 1984.
7. GOST 22690.0-77 «Beton tyazhyolyj. Osnovnye trebovaniya k metodam opredeleniya прочности bez razrusheniya priborami mekhanicheskogo deystviya». M. 1977.
8. GOST 22690-88 «Beton tyazhelyj. Metody opredeleniya прочности bez razrusheniya priborami mekhanicheskogo deystviya». M. 1989.
9. Kratkij spravochnik «Nerazrushayushchiy kontrol' v stroitel'stve». Vena. 2010.
10. SNiP 2.01.07-85* «Nagruzki i vozdeystviya». M. 1989.
11. Moskvina V.M., Alekseev S.N., Verbitskiy G.P., Novgorodskiy V.I. Treshchiny v zhelezobetone i korrozii armatury. M. 1971.
12. Dopuski pri proizvodstve stroitel'no-montazhnykh i special'nykh rabot. Kiev. 1970.
13. Gidroizolyaciya betonnykh konstrukcij. Tekhnologicheskij reglament na primeneniye gidroizolyacionnykh materialov pronikayushchego deystviya sistemy PENETRON. Moskva. 2004.
14. Tekhnologicheskij reglament na vpolnenenie rabot po gidroizolyacii i antikorroziionnoj zashchite monolitnykh i sbornykh betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukcij. Moskva. 2017.

Сведения об авторе / Information about author

Сангинов Абдусамед Мирвазевич, старший научный сотрудник лаборатории сейсмостойкости зданий Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана, кандидат технических наук. Душанбе, Республика Таджикистан. samad80@mail.ru

Sanginov Abdusamad M., Research scientist of the Laboratory of the Building Resistance to Earthquakes, Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology, National academy of Sciences of Tajikistan, PhD in engineering. Dushanbe, Republic of Tajikistan. samad80@mail.ru.

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9983-2022-6-55-70](https://doi.org/10.37153/2618-9983-2022-6-55-70)

Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений

Выбор параметров пружинно-демпферной изоляции здания турбины с виброизолированным фундаментом турбоагрегата в составе

Бабский Александр Евгеньевич¹, Лалин Владимир Владимирович²,
Тарасов Владимир Александрович³

¹Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергoproject» – «Санкт-Петербургский проектный институт», Санкт-Петербург, Российская Федерация
²Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергoproject» – «Санкт-Петербургский проектный институт», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: Сейсмоизоляция – эффективнейший способ достижения сейсмостойкости зданий и сооружений и находящийся в них оборудования. Энергетическим центром любой электростанции является её турбоагрегат – основное оборудование, отвечающее за выработку электроэнергии. Сейсмостойкость турбоагрегата обеспечивается в первую очередь выполнением критериев по сейсмостойкости со стороны фундамента турбоагрегата – специальной строительной конструкции, объединяющей части турбоагрегата в единую систему и служащей для восприятия статических и динамических нагрузок.

Достижение сейсмостойкости фундамента турбоагрегата электростанции путём применения разнообразных систем сейсмоизоляции является актуальным вопросом, рассмотренным в данной статье.

Динамические расчеты проводятся в программном комплексе Nastran методом прямого интегрирования уравнений движения с применением метода конечных элементов. Основными критериями сейсмостойкости виброизолированного фундамента турбоагрегата приняты величины максимальных сейсмических скоростей в осевом направлении на отметке установки турбоагрегата, а также величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов виброизолированного фундамента.

В ходе исследования выполнены сейсмические расчёты фундамента турбоагрегата с различными параметрами двойной системы сейсмоизоляции турбоагрегата. Результаты позволили оценить влияние параметров пружинно-демпферной изоляции здания турбины на сейсмостойкость виброизолированного фундамента турбоагрегата.

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

Для цитирования: Бабский А.Е., Лалин В.В., Тарасов В.А. Выбор параметров пружинно-демпферной изоляции здания турбины с виброизолированным фундаментом турбоагрегата в составе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 6. С. 53-70. DOI [10.37153/2618-9983-2022-6-55-70](https://doi.org/10.37153/2618-9983-2022-6-55-70)

© А.Е. Бабский, В.В. Лалин, В.А. Тарасов. 2022

Seismic protection and seismic isolation of buildings and structures

Selection the parameters of spring-damper insulation of the turbine building with a vibration-isolated turbine foundation inside

Aleksandr E. Babsky¹, Vladimir V. Lalin², Vladimir A. Tarasov³

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

² Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Institute of Civil Engineering, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University Saint-Petersburg, Russian Federation

³ JSC Atomenergoproekt St. Petersburg Branch - St. Petersburg Design Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract: Seismic isolation is the most effective way to achieve seismic resistance of buildings and structures, the equipment located inside. The energy center of any power plant is its turbine unit - the main equipment responsible for generating electricity. The seismic stability of the turbine unit is ensured primarily by the fulfillment of the seismic resistance criteria by the turbine unit foundation - a special building structure that combines the parts of the turbine unit into a single system and serves to take static and dynamic loads.

Achievement of seismic resistance of the turbine unit foundation of a power plant through the use of various seismic isolation systems is a topical issue discussed in this article.

Dynamic calculations were performed in Nastran software using time history analysis and the finite element method. The main criteria for the seismic resistance of a vibration-isolated turbine foundation are the values of the maximum seismic accelerations in the axial direction at the level of the turbine installation and the values of vibration-isolated foundation maximum seismic deformations of vibration isolators.

In the research, seismic calculations of the turbine unit foundation with various parameters of the double seismic isolation system of the turbine unit were performed. The results made it possible to evaluate the influence of the parameters of the turbine building spring-damper insulation on the seismic resistance of the vibration-isolated turbine unit foundation.

Keywords: vibration-isolated turbo-generator set foundation, response spectra, seismic stability, earthquake, seismic isolation, structural dynamics, seismic calculation

For citation: Babsky A.E., Lalin V.V., Tarasov V.A. Selection the parameters of spring-damper insulation of the turbine building with a vibration-isolated turbine foundation inside. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 6, pp. 53-68. (In Russian)
DOI [10.37153/2618-9283-2022-6-53-70](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-53-70)

ВВЕДЕНИЕ

Ряд проектов АЭС проектируемых и возводимых ГК «Росатом», реализуются на площадках, характеризующихся высоким уровнем сейсмичности и значительными уровнями ПЗ и МРЗ.

По российским нормам [1] АЭС должна обеспечивать выработку электрической и тепловой энергии вплоть до уровня ПЗ включительно. Примерами проектов, на площадках которых уровень ПЗ больше 0.1, являются проекты Памил-2, Аккую, Руппур, Эль-Дабаа. География многих из указанных площадок представлена слабыми грунтами с модулем деформации 20 МПа и менее. На площадках могут присутствовать грунты, склонные к разжижению при сейсмике [2].

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

В одной из предыдущих работ одного из авторов [3] подробно описаны наиболее распространённые типы сейсмоизоляторов. В работе [4] описаны методы обеспечения сейсмостойкости виброизолированных фундаментов турбоагрегатов (ФТА) при сохранении классического конструктивного решения здания турбины. В работе [5] авторами изложены результаты исследований влияния различных факторов на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов. Рассмотрено влияние следующих факторов:

- уровень унифицируемого демпфирования в грунтах основания;
- частотный состав сейсмического воздействия;
- соотношение вертикальных и горизонтальных жесткостей виброизоляторов фундамента турбоагрегата;
- проведение сейсмических расчётов виброизолированных фундаментов отдельно и в составе здания турбины;
- проведение сейсмических расчётов виброизолированных фундаментов турбоагрегатов по линейно-спектральной теории и методом прямого интегрирования уравнений движения;
- учёт на то, что зависимость динамических характеристик вязкого демпфера.

В работе [6] автором предложен новый вариант конструктивного решения – система двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата: установка на сейсмоизоляторы всего здания турбины, содержащего в своём составе виброизолированный фундамент турбоагрегата. В работе выполнена серия вариантов расчётов здания турбины и сделан вывод о предпочтительности использования слайдерных опор в «нижнем» сейсмоизолирующем слое – под зданием турбины. Однако, автором работы были получены конструктивные замечания от специалистов фирмы ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» ведущих мировых специалистов в области сейсмостойкости и использования сейсмоизоляции [7-10], в связи с чем автор внес принципиальные изменения в свою работу.

Данная работа посвящена подбору оптимальной системы двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата. Учитывая, в первую очередь, тот факт, что двойная сейсмоизоляция конструкции слайдерными опорами, изоляция в вертикальном направлении не происходит (в связи с высокой вертикальной жесткостью слайдерных опор), а также принимая во внимание сложность адекватного учета локальных эффектов, связанных с возможными ударами в слайдерных опорах при сильных вертикальных сейсмических толчках, автор работы решил отказаться от использования слайдерных опор в системе двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата, однако, основная идея двойной сейсмоизоляции сохранена.

Принципиальная схема двойной системы сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата представлена на рисунке 1. Турбоагрегат, соединённый с конденсаторами, устанавливается на виброизолированный фундамент. Конденсаторы снизу устанавливаются на пружинные опоры. Здание турбины также устанавливается на слой сейсмоизоляторов.

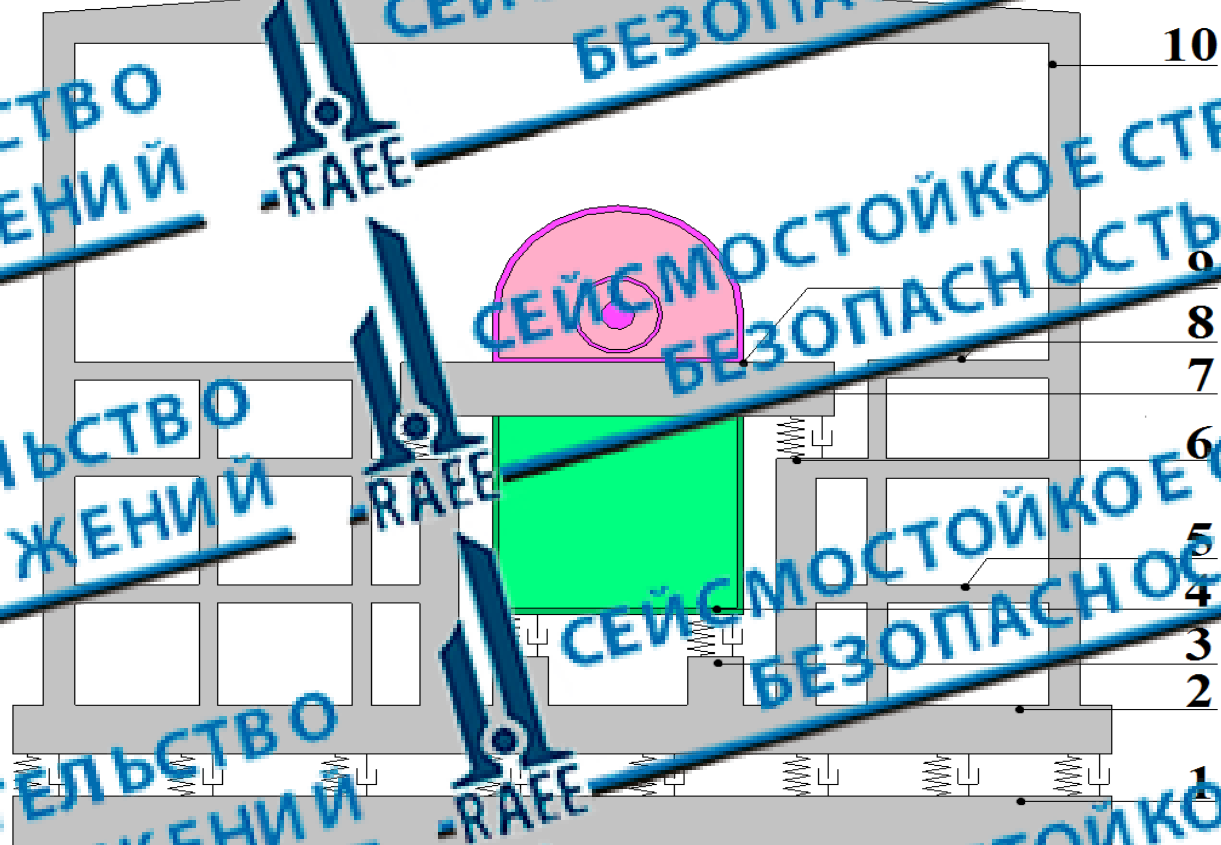


Рисунок 1 – Двойная система сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата

Figure 1 – Double seismic insulation system of turbine unit foundation

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

- быстроходный турбоагрегат К-1200, мощность – 1200 МВт, 3000 об/мин, производитель АО «Силовые машины» («ОИМЗ»+«Электросила»);
- общая масса виброизолированного фундамента турбоагрегата с оборудованием составляет 8300 т;
- здание турбины имеет размеры в плане 124 х 3 м, массу 155000 т. Бетон строительных конструкций класса В25.

Динамические расчеты были проведены в программном комплексе Nastran [7] методом прямого интегрирования уравнений движения. Вязкие демпферы моделировались с учетом частотных зависимостей их динамических характеристик по методике, подробно указанной в работе [8].

В качестве граничных условий использовался набор пружин и демпферов, соответствующий динамическим характеристикам грунта основания, определенным по ASCE 7-16 [11] с учетом ограничений демпфирования $\beta=0.35$, $\xi_{xy}=0.15$, $\xi_z=0.15$. Грунт – слабой сжимаемости с модулем сдвига $G=6400$ МПа, коэффициентом поперечной деформации $\mu=0.27$ и плотностью $\rho=2200$ кг/м³.

В качестве исходного сейсмического воздействия принят реальный площадочный спектр одного из районов Передней Азии с максимальным сейсмическим ускорением в горизонтальном направлении $0.25g$. Спектр исходного сейсмического воздействия в

горизонтальном и вертикальном направлениях представлены на рисунке 2. Расчёты проводились на копии трёхкомпонентных акселерограмм, синтезированных из вышеупомянутых спектров.



Рисунок 2 – Спектр исходного сейсмического воздействия

Figure 2 – Spectrum of initial seismic action

В работе рассмотрено 5 вариантов двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата: первые три варианта – установка здания турбины на пружинные сейсмоизоляторы с различным соотношением вертикальной и горизонтальной жесткостей, но с одинаковой несущей способностью и добавлением сосредоточенных вязких демпферов; первый вариант Т9 – здание турбины изолировано «жесткими» пружинами с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 1, второй вариант Т10 – здание турбины изолировано «средними» пружинами с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 3, третий вариант Т11 – здание турбины изолировано «мягкими» пружинами с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 6. Во всех трех вариантах добавлено такое количество демпферов, чтобы значение относительного затухания в горизонтальных направлениях составляло 15%.

В четвертом и пятом вариантах здание турбины изолировано «верхняя мягкими» в горизонтальном направлении специальными пружинными блоками с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 3. Данные изоляторы условно обозначены Т12. Это позволяет резко снизить частоты низших форм колебаний изолированной конструкции здания турбины в горизонтальных направлениях до 0.8 Гц. Отличие четвертого и пятого вариантов в изоляции фундамента турбоагрегата: в четвертом варианте фундамент турбоагрегата изолирован, как и в первых трех вариантах, «мягкими» изоляторами Т11, в пятом варианте фундамент турбоагрегата изолирован «средними» изоляторами Т10.

Помимо вышеперечисленных вариантов к сравнению добавлены результаты расчетов здания турбины без сейсмоизоляции – в классическом конструктивном решении, вариант «Без СИ».

Для моделирования сейсмоизоляторов в расчетных моделях использованы жесткостные характеристики существующих сейсмоизоляторов немецкой фирмы «ГЕРБ» [12] для пружинных изоляторов и сосредоточенных вязких демпферов.

Параметры сейсмоизоляторов, их количество и характеристики представлены в таблице 1 [12]. В таблице 1 обозначает, что вязкие демпферы моделируются с учетом частотной зависимости жесткостей и демпфирования по методике, представленной в работе [6].

Таблица 1 – Варианты сейсмоизоляции здания турбины

Table 1 – Turbine building seismic isolation variants

Обозначение варианта	Название	Несущая способность, т	$K_{гор}/K_{верт}$, кН	Количество, шт
T9	Пружинный изолятор тип 1	460	178000/ 286000	417
	Вязкоупругий демпфер	-	*	500
T10	Пружинный изолятор тип 2	460	64000/ 190000	417
	Вязкоупругий демпфер	-	*	300
T11	Пружинный изолятор тип 3	460	27000/ 143000	417
	Вязкоупругий демпфер	-	-	200
T12-T10	Пружинный изолятор тип 4	385	9000/ 96000	405
	Вязкоупругий демпфер	-	*	200
	фундамент турбоагрегата изолирован «средними» пружинами T10 с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 6			
T12-T10	Пружинный изолятор тип 4	385	9000/ 96000	405
	Вязкоупругий демпфер	-	*	200
	фундамент турбоагрегата изолирован «средними» пружинами T10 с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 3			

Исходя из требований производителя пружинных изоляторов типов T9, T10 – T11 для их надежной работы во время и после прохождения землетрясения требуется запас по вертикальной несущей способности не менее 20%.

Для специальной серии пружинных блоков (пружинный изолятор, тип 4), разработанной для использования в системах сейсмоизоляции зданий и сооружений,

дополнительный запас по вертикальной несущей способности не требуется. В спецификациях данных пружинных блоков указываются 2 значения несущей способности: при нормальных условиях эксплуатации – базовое значение и при максимальных сейсмических нагрузках – повышенное значение.

Во всех вариантах систем сейсмоизоляции здания турбины изоляторы расставлены таким образом, чтобы центр жесткости поля изоляторов совпадал с центром тяжести здания турбины. Это позволяет исключить крутильные формы колебаний из первых основных форм колебаний здания. Также изоляторы расставлены так, чтобы величины вертикальных деформаций пружинных элементов при постоянных нагрузках по значению были близки между собой.

Схематично поперечный разрез виброизолированного ФТА в составе сейсмоизолированного здания турбины представлен на рисунке 1. На нем пронумерованы уровни вычисления спектров сейсмических ускорений:

- 1 – Уровень нижней дополнительной фундаментной плиты;
- 2 – Уровень нижней плиты здания турбины;
- 3 – Отметка установки изоляторов под конденсаторами;
- 4 – Отметка установки конденсаторов;
- 5 – Уровень промежуточного перекрытия;
- 6 – Отметка установки виброизоляторов (ВИ) под ФТА (верхняя поверхность подопорных конструкций);
- 7 – Уровень ФТА;
- 8 – Отметка обслуживания;
- 9 – Отметка расположения оборудования;
- 10 – Отметка установки мостового крана большой грузоподъемности.

Уровни 4 и 9 представляют интерес с точки зрения прочности оборудования, уровни 1-2, 3-4 и 6-7 характеризуют изменения сейсмических ускорений при прохождении через сейсмоизолирующие слои, остальные уровни были включены в расчет для полноты исследования сейсмического поведения здания турбины в целом.

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

Далее представлены результаты проведенных вычислительных экспериментов. На рисунках 3 и 4 представлены две основные формы колебаний здания турбины в горизонтальном направлении, установленного на «жестких» изоляторах T9; на рисунках 5 и 6 – представлены две основные формы колебаний здания турбины в горизонтальном направлении, установленного на «средних» изоляторах T10; на рисунках 7 и 8 представлены две основные формы колебаний здания турбины в горизонтальном направлении, установленного на «мягких» изоляторах T11; на рисунках 9 и 10 представлены две основные формы колебаний здания турбины в горизонтальном направлении, установленного на «верхнемягких» изоляторах T12.



Рисунок 3 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «X», изоляторы T9, частота 2,78 Гц

Figure 3 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "X" direction, insulators T9, frequency 2.78 Hz



Рисунок 4 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «Y», изоляторы T9, частота 2,02 Гц

Figure 4 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "Y" direction, insulators T9, frequency 2.02 Hz



Рисунок 5 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «X», изоляторы T10, частота 2,04 Гц

Figure 5 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "X" direction, insulators T10, frequency 2.04 Hz

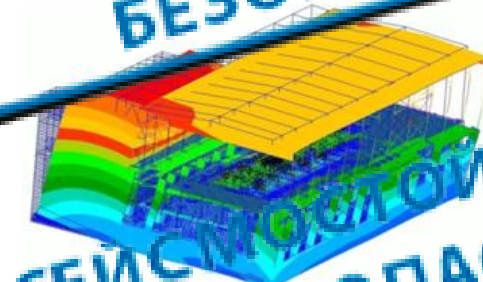


Рисунок 6 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «Y», изоляторы T10, частота 1,71 Гц

Figure 6 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "Y" direction, insulators T10, frequency 1.71 Hz

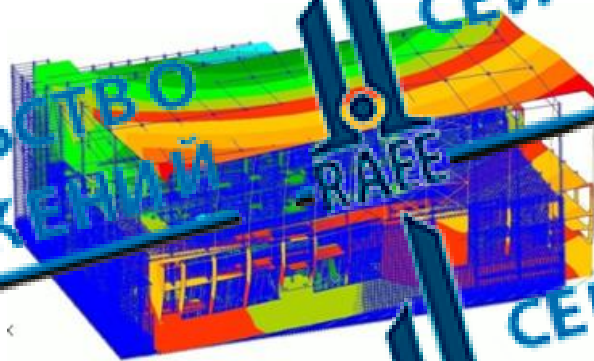


Рисунок 7 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «X», изоляторы T11, частота 1,58 Гц

Figure 7 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "X" direction, insulators T11, frequency 1.58 Hz

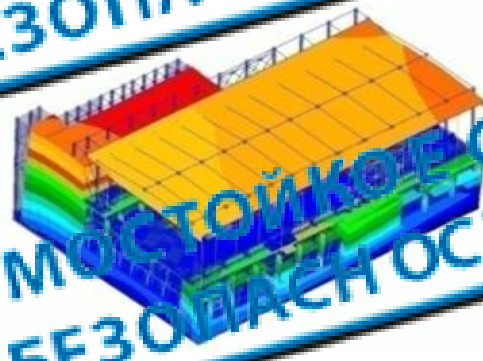


Рисунок 8 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «Y», изоляторы T11, частота 1,09 Гц

Figure 8 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "Y" direction, insulators T11, frequency 1.09 Hz

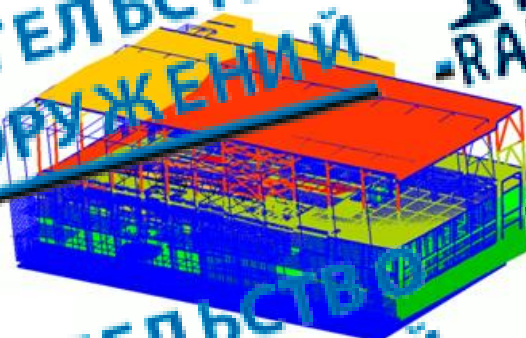


Рисунок 9 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «X», изоляторы T12, частота 0,74 Гц

Figure 9 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "X" direction, insulators T12, frequency 0.74 Hz

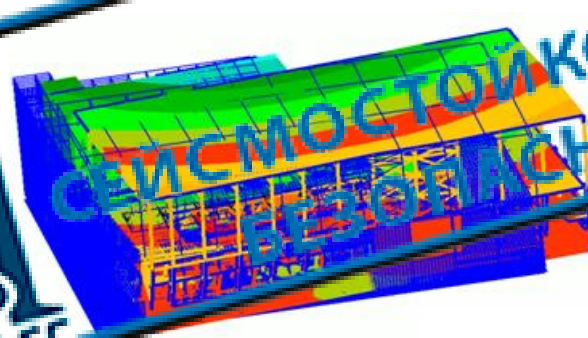


Рисунок 10 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «Y», изоляторы T12, частота 0,76 Гц

Figure 10 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "Y" direction, insulators T12, frequency 0.76 Hz

При проведении вычислительных экспериментов вязкие демпферы учитывались как частотно-зависимые, таким образом, в моделях с демпферами суммарные жесткости сейсмоизолирующего слоя, а, следовательно, и частоты основных форм колебаний здания турбины еще выше, чем при изоляции только пружинными элементами.

Использование «жестких» пружинных изоляторов T12 позволяет увести основные колебания здания турбины в диапазон более высоких частот, чем частоты основных форм колебаний виброизолированного фундамента турбоагрегата. Данный факт положителен с точки зрения ухода от совпадения резонансов, но отрицателен с точки зрения попадания в них спектра. Использование «сверхжестких» изоляторов T12 позволяет увести основные

колебания здания турбины в диапазон более низких частот, чем частоты основных форм колебаний виброизолированного фундамента турбоагрегата. Чтобы проиллюстрировать вышесказанное, на рисунке 11 представлен спектр сейсмического воздействия в осевом направлении с наложенными на него собственными частотами изолированного здания турбины с различными вариантами демпфоизоляции.

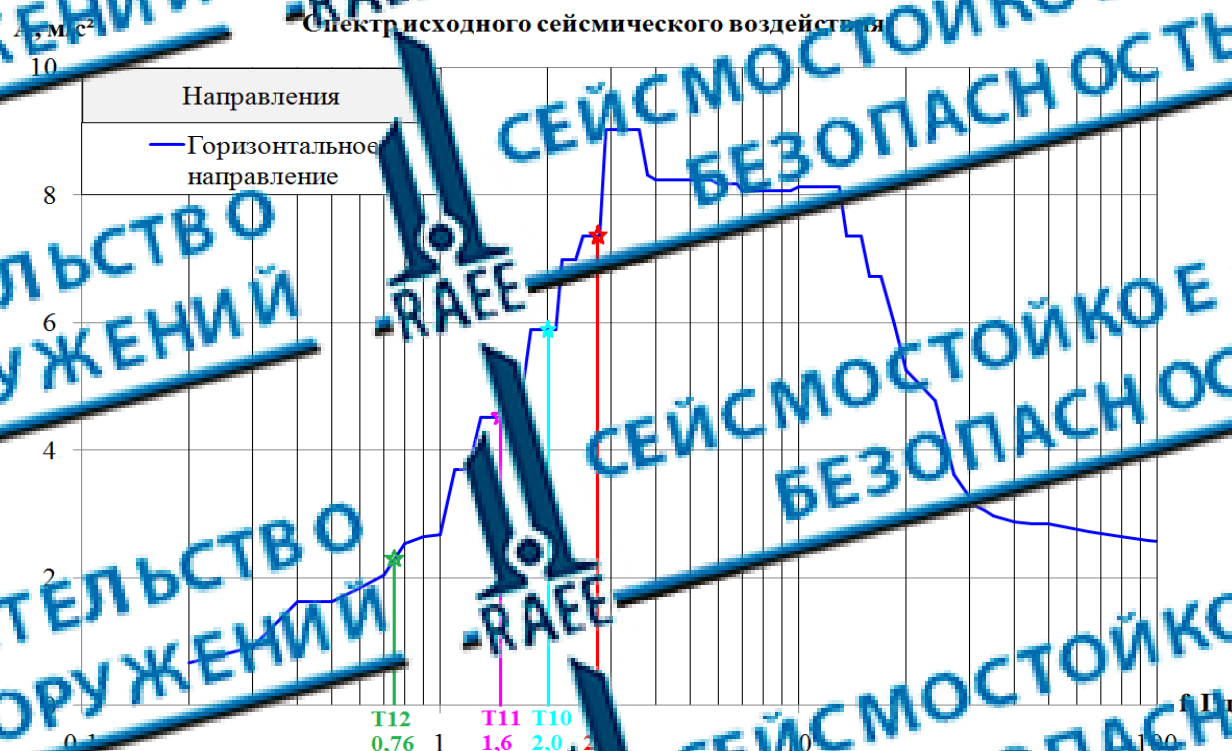


Рисунок 11. Спектр сейсмического воздействия в осевом направлении с наложенными на него собственными частотами различных вариантов

Figure 11 – Seismic accelerations spectrum in the axial direction with natural frequencies of different variants of double seismic insulation system of turbine unit foundation

Результаты расчетов спектров сейсмических ускорений в осевом направлении для сметки установки турбоагрегата представлены на рисунке 12, для всех рассматриваемых отметок в таблице 2, нумерация урочий в таблице соответствует нумерации на рисунке 1. Результаты вычисления максимальных сейсмических смещений представлены в таблице 3.

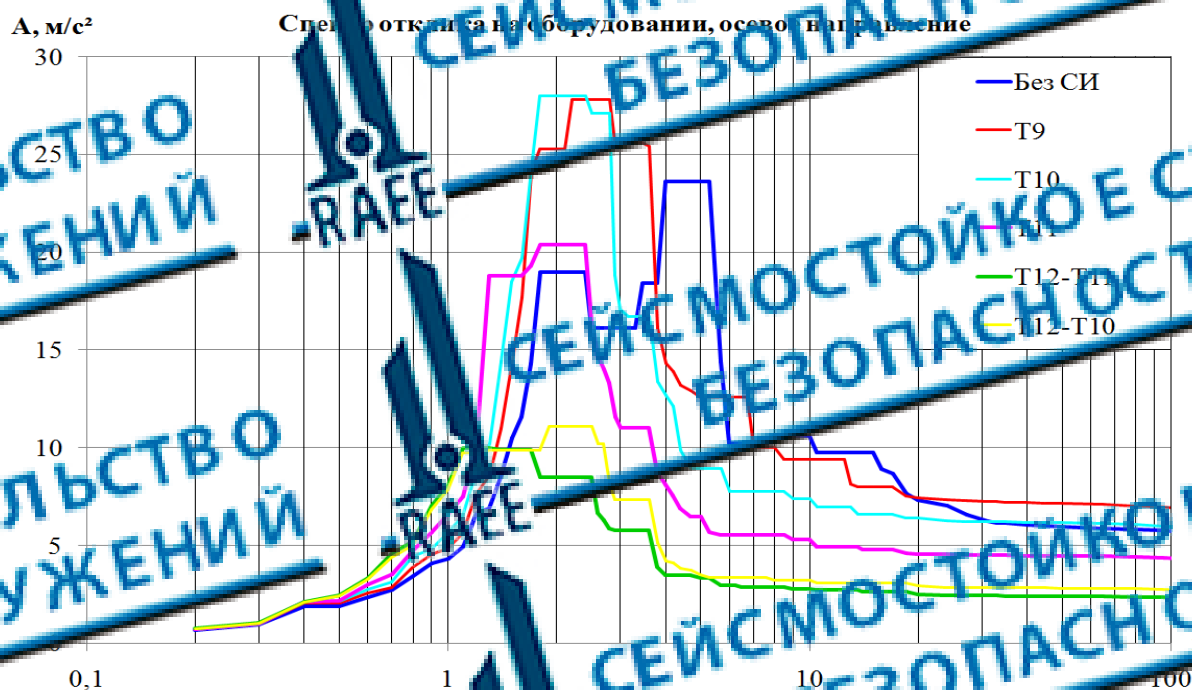


Рисунок 12 – Спектры откликов сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 12 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 2 – УНП в осевом направлении, в m/s^2

Table 2 – ZPA in the axial direction, m/s^2

Отметка	Без СИ	T9	T10	T11	T12-T11	T12-T10
1 (нижняя плита фунда. плита)	-	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
2 (нижняя плита здания)	3,1	4,0	2,8	2,3	1,5	1,5
3 (под БИ кол.)	7,0	1,3	3,2	2,7	1,7	1,7
4 (на кол.)	5,7	6,3	3,9	3,2	1,3	1,8
5 (перекрытие промежуточное)	13,8	7,0	4,0	2,8	1,8	1,8
6 (под ВИ ФТА)	12,2	7,0	5,2	3,8	2,0	2,0
7 (ФТА)	5,4	6,6	5,6	3,9	2,4	2,7
8 (эм. пл. обслуживания)	16,6	9,1	6,0	3,8	2,0	2,0
9 (на оборудовании)	5,7	6,9	6,0	4,3	2,4	2,7
10 (верх колонн)	18,2	11,2	5,0	3,0	2,3	2,3

Из анализа графиков на рисунке 12 и таблицы 2 ясно, что снижение величин пиковых осевых сейсмических ускорений на отметке установки турбоагрегата достигается лишь при сейсмоизоляции здания турбины «сверху вниз» в горизонтальном направлении пружинными блоками (условно обозначены T12): УНП спектра снижается до 0,24–0,27g, т.е. более чем в 2 раза по сравнению с классическим конструктивным решением здания турбины без системы сейсмоизоляции (Без СИ), максимальные спектральные ускорения снижаются более чем в 2 раза.

В то же время, использование систем сейсмоизоляции, приводящих к близости частот изолированного здания турбины и фундамента турбоагрегата, приводит к резкому возрастанию амплитуд колебаний в системе «основание – здание турбины – виброизолированный фундамент турбоагрегата»: УНП спектра возрастает до 0,7g, т.е. в 1,2 раза по сравнению с классическим конструктивным решением здания турбины без системы сейсмоизоляции, максимальные спектральные ускорения возрастают в 2 раза. Таким образом, неграмотно подобранная система сейсмоизоляции здания турбины может сильно испортить конструкцию и снизить сейсмостойкость виброизолированного фундамента турбоагрегата.

Более того, из анализа таблицы 2 видно, что сейсмоизоляция здания турбины резко снижает пиковые сейсмические ускорения – максимальные спектральные ускорения на

всех отметках здания турбины, что положительно сказывается на прочем (помимо турбоагрегата) оборудовании и строительных конструкциях.

Таблица 3 — Максимальные сейсмические перемещения в мм

Table 3 – Maximum seismic displacements in mm

Пара узлов	Направление	Без СИ	T9	T10	T11	T12-T11	T12-T10
ВИ под зданием турбины	Горизонтальное	-	7,9	12,2	22,5	35,7	36,6
	Вертикальное	-	22,8	30,5	25,5	12,2	12,3
ВИ под конденсатором	Горизонтальное	8,8	11,8	11,8	9,2	8,0	7,2
ВИ под ФТА	Горизонтальное	43,7	52,1	49,6	33,8	21,4	16,9
ФТА-отметка обслуживания	Горизонтальное	3,5	59,1	40,2	29,8	22,6	15,0

Из анализа таблицы 3 можно заключить, что использование «сверхмягких» в горизонтальном направлении пружинных блоков T12 в качестве изоляции здания турбины позволяет снизить максимальные сейсмические перемещения под конденсаторами до 7–8 мм и под ФТА до 17–24 мм, что в 1,5–1,5 раза ниже, по сравнению с классическим конструктивным решением здания турбины без системы сейсмоизоляции. Также снижаются значения относительных смещений фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания с 54 до 23 мм.

Одновременно с этим, использование систем сейсмоизоляции, приводящих к близости частот изолированного здания турбины и фундамента турбоагрегата, и как следствие, к резкому возрастанию амплитуд колебаний в системе «основание – здание турбины – виброизолированный фундамент турбоагрегата», приводит к росту максимальных сейсмических перемещений в 1,5 раза и более по сравнению с классическим конструктивным решением здания турбины без системы сейсмоизоляции.

При установке здания турбины на изоляторы возникает еще один выходной параметр, который косвенно влияет на сейсмостойкость виброизолированного фундамента турбоагрегата, а именно максимальные сейсмические перемещения здания турбины относительно земли (деформации грунта и изоляторов). Здание турбины (машинный зал) обязательно имеет технологические связи с другими зданиями и сооружениями электростанции. Так, на всех типах электростанций генератор турбоагрегата связан силовыми кабелями с трансформаторами и зданиям распределительных устройств. В проектах атомных электростанций здание турбины связано со зданием реактора трубопроводами опорожнения, питающего турбину. Таким образом, необходимо сохранить целостность и работоспособность всех систем здания турбины, отвечающих за выработку электроэнергии. Следовательно, что для этого необходимо по возможности снизить максимальные сейсмические перемещения здания турбины относительно земли и остальных зданий и сооружений электростанции.

Учитывая, что по параметрам максимальных сейсмических ускорений на отметке установки турбоагрегата, а также по значениям максимальных сейсмических перемещений под фундаментом турбоагрегата возможны два использования только для

варианта из предложенных: т.е. здание турбины изолировано «смягкими» в горизонтальном направлении пружинными блоками (Т.2). Максимальное горизонтальное смещение здания турбины составляет 37 мм. Производитель изоляторов ограничивает максимальные горизонтальные смещения величиной 100 мм. Максимальные вертикальные сейсмические деформации в изоляторах под зданием турбины составляют 13 мм, что не превосходит предельной осадки пружин под зданием турбины от постоянных нагрузок при нормальных условиях эксплуатации (45 мм). Таким образом, при сейсмических колебаниях в нижнем слое сейсмоизоляторов не возникает растягивающих напряжений, а амплитудное значение сжатия не приводит к полному смятию пружин изоляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный новый вариант двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата может быть использован на перспективных проектах в самом начале проектных работ. Данный вариант позволит возводить сейсмостойкий виброизолированный фундамент турбоагрегата и здание турбины в районах с особо высокой сейсмичностью, где ранее возведение сейсмостойкой электростанции не представлялось возможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 9.133.01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций, 2001.
2. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. 2018.
3. Тарасов В.А. и др. Системы сейсмоизоляции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 1(43). С. 117 – 140.
4. Тарасов В.А. Обеспечение сейсмостойкости виброизолированного фундамента турбоагрегата // Природные и техногенные риски. 1. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 44 – 47.
5. Бабский А.Е., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С. 36 – 49. DOI: 10.37155/2618-9283-2021-5-36-49.
6. Tarasov V.A. Double Seismic Isolation System of Turbine Unit Foundation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020, Vol.91, Article No. 90. doi: 10.18720/CUBS.91.1.
7. MSC/NASTRAN. Linear Static/Dynamic Analysis User Guide, Version 70, the MacNeal-Schwendler Corporation, Los Angeles, California, 1993.
8. Kostarev V., Berkovski A., et. al. Application of mathematical model for high viscous damper to dynamic analysis of NPP piping. *Proc. of 10th ECEE*, 1994, Vienna, Austria.
9. Kostarev V.V., Vasilev P.S., Nawrotzki P. A new approach in seismic base isolation and dynamic control of structures. *Transactions of the 23rd Annual Technical Conference and 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, 2017, Auckland, NZ.
10. Nawrotzki P., Kostarev V., Siepe D., Barutzki J., Salcedo V. (2022) 3D Seismic Isolation Systems for the Nuclear Industry Layout, Design & Qualification, SMIRT-26.
11. ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016.
12. GERB Schwingungsisolierungen GmbH & Co. URL: <https://www.gerb.com> (дата обращения: 18.12.2022).

REFERENCES

1. NP-031-01 Normy projektirovaniya seismostojkix atomnykh stancij, 2001. (In Russian)
2. SP 14.13330.2018 Seismic building design code, 2018. (In Russian)
3. Tarasov V.A., and, etc. Sistemy seismoizolyatsii [Seismic isolation systems. Construction of Unique Buildings and Structures. 2016, No.43(4), pp. 117– 140. (In Russian)
4. Tarasov V. Ensuring seismic stability of the vibration-insulated foundation of the turbine unit. *Natural and Technological Risks. Building Safety*. 2020. 1: 44– 47. (In Russian)
5. Babsky A.E., Tarasov V.A. Seismic stability of vibration-insulated turbine foundations. *Seismostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 36– 49. (In Russian) DOI: 10.37153/2618-9282-2021-5-36-49 (In Russian)
6. Tarasov V.A. Double seismic Insulation System of Turbine Unit Foundation; 2020; *Construction of Unique Buildings and Structures*. Vol. 91, Article No. 9101. doi:10.18720/CUBS.111
7. MSC/NASTRAN. Linear Static/Dynamic Analysis, User Guide, Version 70, the MacNeal-Schwendler Corporation, Los Angeles, California, 1998.
8. Kostarev V., Berkovski A., et al. Application of mathematical model for high viscous damper to dynamic analysis of NPP reactor. *Proc. of 10th ECEE*, 1994, Vienna, Austria
9. Kostarev V.V., Vasilyev P., Nawrotzki P., A new approach in seismic base isolation and dynamic control of structures. *Transactions of the NZSEE Annual Technical Conference and 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, 2017, Auckland, NZ.
10. Nawrotzki P., Kostarev V., Stepe D., Barutzki F., Salcedo V. (2022). 3D Seismic Isolation Systems for the Nuclear Industry Layout, Design & Qualification, SMIT-23
11. ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016.
12. GERB Schwingungsisolierungen GmbH & Co. KG URL: <https://www.gerb.com> (date of the application: 18.12.2022).

Данные об авторах / Informaion about authors

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

Aleksandr E. Babsky, Chief Specialist of the dynamics of structures, construction department – turbine island, St. Petersburg branch of JSC Atomenergo-proekt - St. Petersburg design institute; eLIBRARYSPIN code: 9620-8675 ORCIDiD: <https://orcid.org/0000-0002-8297-1630>

Лалин Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; eLIBRARYSPIN код: 8220-6921, ORCIDiD: <https://orcid.org/0000-0003-3850-424X>

Vladimir V. Lalin, doctor of technical sciences, professor of the Higher school of industrial, civil and road construction, Institute of civil engineering, Peter the Great St. Petersburg polytechnic university; eLIBRARYSPIN code: 8220-6921, ORCIDiD: <https://orcid.org/0000-0003-3850-424X>

Тарасов Владимир Александрович, инженер по проектированию, строительный отдел – турбинный остров, Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергoproект» – «Санкт-Петербургский проектный институт», ассистент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, eLIBRARYSPIN-код: 9264-3744, ORCIDiD: <http://orcid.org/0000-0002-1030-8370>

Vladimir A. Tarasov, design engineer, construction department – turbine island, St. Petersburg branch of JSC Atomenergoproekt – St. Petersburg design institute, assistant of the Higher school of industrial, civil and road construction Institute of civil engineering; St. Petersburg polytechnic university of Peter the Great; eLIBRARYSPIN-код: 9264-3744, ORCIDiD: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>

УДК 624.042.7

DOI [10.37153/2618-9283-2022-6-71-76](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-71-76)

Градостроительные проблемы сейсмобезопасности

Определение сейсмической безопасности зданий и сооружений в Нижнем Поволжье и на Северном Каспии

Набиев Рамазан Абдуллунович¹, Курдюк Андрей Юрьевич², Башмачников Владимир Дмитриевич³

^{1,2,3} Астраханский государственный технический университет.
Астрахань, Российская Федерация

Аннотация: В последние годы актуальной тематикой исследований ученых и инженеров становится изучение рисков в районах интенсивной застройки: геодинамических явлений и процессов различных видов и масштабов с отрицательными экологическими и социально-экономическими последствиями. Считается, что данные процессы происходят в основном в подвижных (орошаемых) регионах. Наиболее опасными являются индуцированные землетрясения вследствие протекания экзогенных процессов, которые, в свою очередь, являются источником геодинамического риска. Подобные условия сложились также на территории Нижнего Поволжья и Северного Каспия, где основания в большинстве своем сложены грунтами третьей категории по сейсмическим свойствам, которые, являясь поверхностными отложениями, увеличивают интенсивность приходящего воздействия. В настоящее время данные факторы по сейсмической безопасности не учитываются при проектировании зданий и сооружений в городе и в целом по региону. Слабые водонасыщенные грунты оснований и обширная картина литологического состава способны изменить интенсивность и спектральный состав сейсмического воздействия. Существующий подход на сегодняшний день к оцениванию сейсмической опасности в стране основывается на предположении о влиянии грунтов на территории, по своей площади во много раз превышающей площадь застройки. Тем не менее, исследования разрушительных землетрясений, а также научные работы и изыскания некоторых исследователей наглядно доказывают влияние грунтов на бытовую площадь территорий на интенсивность и спектральный состав сейсмических колебаний. Управлять рисками можно, зная сейсмические свойства оснований, а также определяя динамические параметры существующих зданий и сооружений, т.е. необходимо не только внедрять проектирование и строительство сейсмостойких зданий и сооружений, но и проводить комплекс работ по оценке, проектированию и усилению существующих зданий и сооружений с целью недопущения их разрушения.

Ключевые слова: сейсмичность, основания, сейсмическое микрорайонирование, управление рисками

Для цитирования: Набиев Р.А., Курдюк А.Ю., Башмачников В.Д. Определение сейсмической безопасности зданий и сооружений в Нижнем Поволжье и на Северном Каспии // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 6. С. 71–76
DOI [10.37153/2618-9283-2022-6-71-76](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-71-76)

@ Набиев Р.А., Курдюк А.Ю., Башмачников В.Д., 2022

Urban planning problems of seismic safety

Determination of seismic safety of buildings and structures in the Lower Volga region and the Northern Caspian

Ramazan A. Nabiyev¹, Andrey Yu. Kurdyuk², Vladimir D. Bashmachnikov³
^{1,2,3} Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation

Abstract: In recent years, new risks in areas of intensive development – geodynamic phenomena and processes of various types and scales with negative environmental and socio-economic consequences – have become an urgent topic for scientists and engineers. It is believed that these processes occur mainly in mobile (orogenic) regions. The most dangerous are induced earthquakes due to the course of natural processes, which in turn are a source of geodynamic risk. These conditions have also developed on the territory of the Lower Volga region and the Northern Caspian Sea, where the bases are mostly composed of soils of the third category in terms of seismic properties, which, in turn, being surface deposits, increase the intensity of the incoming impact. Currently, these seismic safety factors are not taken into account when designing buildings and structures in the city and in the region as a whole. Weak water-saturated soils of the bases and an extensive plume of the lithological composition are able to change the intensity and spectral composition of seismic impact. The current approach to assessing the seismic hazard in the country is based on the assumption of the influence of soils on the territory, in this area many times larger than the built-up area. Nevertheless, surveys of destructive earthquakes, as well as scientific work and research by some researchers clearly prove the influence of soils of small territories on the intensity and spectral composition of seismic vibrations. Risks can be managed by knowing the seismic properties of the foundation as well as determining the dynamic parameters of existing buildings and structures, i.e. not only to implement the design and construction of earthquake-resistant buildings and structures, but also to carry out a complex of work on the elimination, design and reinforcement of existing buildings and structures in order to prevent their destruction.

Keywords: seismicity, foundations, seismic microzoning, risk management

For citation: Nabiyev R.A., Kurdyuk A.Yu., Bashmachnikov V.D. Determination of seismic safety of buildings and structures in the Lower Volga region and the Northern Caspian. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 6, pp. 71–76 (In Russian). DOI: [10.37153/2618-9283-2022-6-71-76](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-71-76)

Актуальность исследования обусловлена тем фактом, что в районах интенсивной застройки городов происходят серьезные геодинамические явления и процессы различных типов и масштабов с отрицательными экологическими и социально-экономическими последствиями. В литосфере отражаясь на Земной поверхности, изо дня в день происходят различные геодинамические процессы. Обычно считается, что данные геодинамические процессы возникают в основном в тектонических (орогенных) регионах. Требуется радикальное изменение представлений о геодинамическом состоянии сред на платформенных территориях, на наш взгляд. Формируется достаточно высокая современная сейсмическая активность на платформенных склонах масштабом до 7 см в год и выше. В последние десятилетия на Русской платформе происходит значимо большее количество землетрясений интенсивностью более 7 баллов. Верхние слои литосферной

платформы динамично участвуют в глобальных деформационных процессах, что явно не только изменяет представления о реальном уровне современного геодинамического состояния недр на платформах, но и делает еще более актуальными задачи по обеспечению сейсмической безопасности существующих зданий и сооружений.

Постановлением Правительства РФ [1] введена федеральная целевая программа «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации на 2009 – 2018 годы» и с 2018 года – в рамках основного мероприятия «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации» государственная программа Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» [2,3], в рамках которой осуществляется целый комплекс мероприятий по улучшению систем мониторинга и последующего прогнозирования возможных чрезвычайных ситуаций, обусловленных сейсмической активностью. Результаты мониторинга и прогнозирования данных ситуаций имеют важное значение для определения основных направлений в области сейсмостойкости и усиления при планировании и реализации основных мероприятий, для принятия решений о сейсмоусилении существующих зданий и сооружений или строительстве новых сейсмостойких объектов.

В Астраханской области согласно комплекту карт ОСР-07 и списка населенных пунктов Российской Федерации, расположенных в сейсмических районах, указанного в [4], сейсмичность территории региона уменьшается с севера на юг, так северная часть города Астрахани перестает быть сейсмически активной. В связи этим, в семиречную зону попадают особо ответственные объекты капитального строительства, находящиеся северней Астрахани, а также и объекты повышенной ответственности. Выбор карты, по которой требуется определить исходную сейсмичность, возлагается на заказчика или соответствующий орган исполнительной власти, а ведь в этом районе, расположен Ахтубинский газоперерабатывающий завод.

При определении расчетной сейсмической активности не обращают внимания на тот весьма значительный факт, что исходная сейсмичность заимствуется по тем самым картам сейсмического районирования [5], и справедлива она только для средних грунтовых условий и должна корректироваться по данным сейсмического микрозонирования или по таблице I [4]. Данный подход основывается на фактах существенного влияния грунтов, поверхностного отложения на интенсивность и спектральный состав сейсмических колебаний. Поэтому очень важным составляющим при определении расчетной сейсмической опасности является комплекс работ для выбора эталонных (средних) грунтов и акселерограмм для расчетных землетрясений. Так [6, 7, 8], в качестве эталонного грунта могут быть характерны для верхней части разреза необходимые супесчано-суглинистые грунты, включением дресвяно-песнистого или гравийно-галечникового материала, или же крупно-среднезернистые песчаные грунты средней плотности, относящиеся по II категории к сейсмическим свойствам, в соответствии с таблицей I [4]. Из всего вышесказанного следует, что приведенные в ОСР-07 данные должны быть подкорректированы в сторону увеличения на 1 балл, и в этом случае город Астрахань попадает в сейсмически опасную зону также и по критериям Б и С.

При определении сейсмичности Астраханского региона также надо учитывать тот факт, что ежегодно происходит увеличение сейсмической опасности по причине хозяйственного освоения территории и воздействия человека на литосферную оболочку Земли (добыча полезных ископаемых, строительство гидротехнических сооружений, промышленные взрывы и т.д.) [9]. Также требуется иметь в виду увеличение риска, связанного с существующими экологически опасными объектами в таких районах.

Получается зависимость добычи полезных природных ископаемых в Ахсарайском месторождении, основан на нефтяных залежах в северной части Каспийского моря увеличивают сейсмическую опасность, незначительные землетрясения могут существенно нарушить нормальное функционирование этих объектов [10,11]. Наличие данных объектов на территории Астраханской области требует установки специальной триангуляционной сети, необходимой для наблюдений за деформациями, происходящими в результате разработки полезных ископаемых по всему региону [12,13].

Также требуется иметь в виду то, что на территории города Астрахани основные в основном сложены из грунтов третьей категории по сейсмическим свойствам, которые в свою очередь, являются подверженными осложнениями, усиливая интенсивность для приходящих воздействий, что в данное время не учитывается при проектировании зданий и сооружений как в Астрахани, так и в регионе в целом [14].

Все вышеперечисленное указывает на тот факт, что определение исходной сейсмической балльности, а также вопросы сейсмического микрорайонирования в городе Астрахани и в области остаются открытыми...

Для достижения поставленной цели, а в итоге, снижения уровня риска возникновения чрезвычайной ситуации в регионе вследствие землетрясений, требуется проведение экспертизы существующих зданий и сооружений, принятие решений и инженерных изысканий, предъявляя особо высоких требований к качеству строительных работ, учитывая тот факт, что объективная экспертиза проектов – основа высокого уровня надежности достигнутого технического решения [15,16]. С этой целью на базе института градостроительства Астраханского государственного технического университета и была открыта лаборатория надежности зданий и сооружений, основной целью деятельности которой является проведение экспертизы существующих зданий и сооружений по определению их надежности в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства РФ от 23.04.2009 г.
2. Постановление Правительства РФ от 3 декабря 2017 г. N 1710 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями)
3. Постановление Правительства РФ № 1 от января 2006 г.
4. СП 14-13550.2018. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (с в. и введен в действие Приказом Министра России от 24.05.2018 N 309/пр). 50 с.
5. Приказ Рострострой от 02.07.2007 № 188 «Требованиях к составу, содержанию и порядку оформления заключения государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 16.07.2007 № 9853)
6. РСН 60-86 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. Госстрой РСФСР. М.: МосЦИСИЗ Госстроя РСФСР. 1986. 32 с.
7. РСН 65-87 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. Госстрой РСФСР. М.: МосЦИСИЗ Госстроя РСФСР. 1987. 20 с.
8. Методика сейсмического микрорайонирования застраиваемых (осваиваемых) территорий РСФСР с учетом региональных инженерно-геологических особенностей и

- техногенных факторов. Москва: Стройизыскания РСФСР, научно-проектное объединение «Стройизыскания». М.: 1981. 23 с.
9. Молоков Л.А. Взаимодействие инженерных сооружений с геологической средой. М.: Недра. 1988. 222 с.
10. Эйби Дж. Землетрясения. М.: Недра. 1982. 264 с.
11. Морозов В.В., Ларатов В.Г. Отчёт о сейсмическом микрозонировании г. Ярославля. Ярославль: 1985.
12. Голубцова М.Н., Шефтер О.Я. Влияние изменения свойств грунта в основании сооружения при распространении колебаний на поверхности слоя. Научные труды НИИОСП. Вып. 80. М.: СИ. 1986. С. 97-103.
13. Ильичев В.А., Курдюков А.Ю., Лиховцев В.И. Оценка влияния искусственной подготовки основания на интенсивность и спектральный состав сейсмических колебаний. Фундаменты и основания в условиях статического и динамического нагружения. Труды НИИОСП. Вып.86. М.: ПЭМ. Москва СССР. 1986. С. 103 –113.
14. Ильичев В.А., Курдюков А.Ю., Лиховцев В.И. Методика оценки влияния искусственного основания на интенсивность и спектральный состав сейсмических колебаний // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1992. №6. С. 28 – 30.
15. Сейсмический риск и инженерные решения. Под редакцией Л. Ломnitz. Э. Розенблюта. М.: Недра. 1981.
16. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрозонированию. М.: Наука, 1988.

REFERENCES

1. Decree of the Government of the Russian Federation. No. 365 of 23.04.2009. (In Russian)
2. Decree of the Government of the Russian Federation of December 30, 2017 No. 1740 "On approval of the State Program of the Russian Federation "Provision of affordable and comfortable housing and communal services to citizens of the Russian Federation" (with amendments and additions). (In Russian)
3. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1 of January 6, 2006. (In Russian)
4. SP 4.13330.2018. Rules. Construction in seismic areas. Updated version of SNiP II-7-81* (approved and put into effect by the Order of the Ministry of Construction of Russia dated 24.05.2018 N 309/pr). 50 p. (In Russian)
5. Order of Gosstroy dated 02.07.2007 No. 188 "On the requirements for the composition, content and procedure for issuing the conclusion of the State examination of project documentation and engineering survey results" (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 16.07.2007 No. 9853). (In Russian)
6. RSN 60-86 Engineering surveys for construction. Seismic microdistricting. Norms of work production. Gosstroy RSFSR. M.: Mostgisiz Gosstroy RSFSR. 1986. 32 p. (In Russian)
7. RSN 63-87 Engineering surveys for construction. Seismic microdistricting. Technical requirements for the production of works. Gosstroy RSFSR. M.: MosSGISIZ Gosstroy RSFSR. 1987. 20 p. (In Russian)
8. Methodology of seismic microdistricting of built-up (developed) territories of the RSFSR, taking into account regional engineering and seismological features and technogenic factors. Goskomarchstroy of the RSFSR, scientific and production association "Stroyizskaniya". M.: 1991. 23 p. (In Russian)
9. Molokov L.A. Interaction of engineering structures with the geological environment. M.: Nedra. 1988. 222 p. (In Russian)

10. Abi J. Earthquake. M.: Nedra. 1982. 264 p. (In Russian)
11. Morozov V.A., Sharano V.G. Report on seismic micro-districting of Grozny. Pyatigorsk, 1985. (In Russian)
12. Goultsova M.M., Shtcher O.Ya. The influence of changes in soil properties at the base of the structure during the propagation of vibrations on the surface of the layer. *Scientific work of NIIOSP*. Issue 80. Moscow: ST. 1980, pp. 97 – 106. (In Russian)
13. Ilyichev V.A., Kurdyuk A.Yu., Likhovtsev V.I. Evaluation of the effect of artificial preparation of the base on the intensity and spectral composition of seismic vibrations. Foundations and foundations under static and dynamic loading conditions. *Proceedings of the NIIOSP*. Issue 86. Moscow: PTM Gosstroy of the USSR. 1986, pp. 103–113. (In Russian)
14. Ilyichev V.A., Kurdyuk A.Yu., Likhovtsev V.I. Methodology for assessing the influence of artificial foundations on the intensity and spectral composition of seismic vibrations. *Foundations, foundations and mechanics of soils*. 1992, No. 6, pp. 28 – 30. (In Russian)
15. Seismic risk and engineering solutions. Edited by C. Lomnitz, E. Rosenblut. M.: Nedra. 1981. (In Russian)
16. Assessment of the influence of ground conditions on seismic hazard. Methodological guide to seismic microdistricting. Moscow: Nauka. 1988. (In Russian)

Данные об авторах / Information about authors

Набиев Рамазан Абдулмунинович, доктор экономических наук, профессор, директор Института градостроительства Астраханского государственного технического университета, заведующий кафедрой «Экономика и управление предприятием». Астрахань, Российская Федерация

Ramazan A. Nabiev, doctor of economics, professor, director of the Institute of urban planning of Astrakhan State Technical University, head of the Department of economics and enterprise management. Astrakhan, Russian Federation

Курдюк Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Института градостроительства Астраханского государственного технического университета. Астрахань, Российская Федерация, ayuk58@mail.ru

Andrey Yu. Kurdyuk, candidate of Technical Sciences, associate professor of the Institute of urban planning, of Astrakhan State Technical University. Astrakhan, Russian Federation, ayuk58@mail.ru

Башмачников Владимир Дмитриевич, аспирант института градостроительства Астраханского государственного технического университета. Астрахань, Российская Федерация, molotok@astrakhan.ru

Vladimir D. Bashmachnikov, postgraduate of the Institute of urban planning, of Astrakhan State Technical University. Astrakhan, Russian Federation, molotok@astrakhan.ru