



УДК: 624.078

DOI: 10.35803/1694-5298.2021.2.242-249

**БОЛОТБЕК Т., АБДЫРАИМОВ Д.Ж., КАРАБАШОВ А.А.,
КУДАЙБЕРГЕНОВ С.Б., МУКАНБЕТОВА Б.З., ЖЕНИШБЕК УУЛУ Н.**

¹Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им.
Н.Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика

**BOLOTBEK T., ABDYRAIMOV D.J., KARABASHOV A.A.,
KUDAYBERGENOV S.B., MUKANBETOVA B.Z., ZHENISHBEK UULU N.**

¹Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture n.a. N.Isanov, Bishkek,
Kyrgyz Republic
temir.b.amir@gmail.com

РАСЧЕТ РЕЗИСТЕНТНЫХ К СЕЙСМИЧЕСКИМ УСИЛИЯМ ЗДАНИЙ ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЯМ

CALCULATION OF SEISMIC RESISTANT BUILDINGS ON MOVEMENT

*Макалада сейсмикалык жылышуу күчтөрүнө туруктуу имараттарды эсептөө
ыкмасы талкууланат. Сандык симуляциянын натыйжалары келтирилген..*

Өзөк сөздөр: акселерограмма, спектрдик курам, сейсмикалык изоляция, резина-
металл таянычы, сейсмикалык аракет, темир бетон, түз динамикалык ыкма.

*В статье рассматривается метод расчёта зданий, имеющих резистентность к
сейсмическим усилиям по перемещениям. Приведены результаты численного моделирования.*

Ключевые слова: акселерограмма, спектральный состав, сейсмоизоляция,
резинометаллическая опора, сейсмическое воздействие, железобетон, прямой динамический
метод.

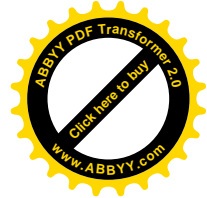
*The article discusses a method for calculating buildings that are resistant to seismic
displacement forces. The results of numerical simulation are presented.*

Key words: accelerogram, spectral composition, seismic isolation, rubber-metal support,
seismic action, reinforced concrete, direct dynamic method.

Как известно, землетрясения могут иметь разрушительные последствия, поэтому
разработка методов расчёта строительных конструкций по сейсмическому воздействию
остаётся актуальной и практически значимой задачей согласно [1].

Строительство зданий и сооружений в районах со значительной сейсмической
эмиссией сопряжено с рядом проблем, таких как недостаточная резистентность конструкций
к сейсмическому нагружению.

Текущие методы определения сейсмических нагрузок на здания и сооружения
основаны на динамическом подходе к проблеме и используют теорию сейсмических
колебаний. Одним из таких методов является расчёт на основе реальных перемещений и
деформаций строительных конструкций при возникающих сейсмических нагружений. Расчёт
сейсмических сил производится способом численного решения дифференциальных
уравнений колебаний, а инструментальная акселерограмма одного из последних сильных
землетрясений реальной и конкретной местности берётся как функция $V(t)$. Расчёты
выполняются с использованием программного обеспечения – Robot Structural Analysis, Lira
или любой другой доступной на рынке, которые основаны на Метода конечных элементов.



При настройке сейсмического эффекта есть необходимость принять во внимание сейсмически изолированные структуры. Виды сейсмических эффектов могут быть отображены в спектральной картине визуализации. В этом случае смещения не учитываются.

Спектральная численная модель используется для определения сейсмических сил. Он не дает точного описания флуктуаций сейсмических сил в различных диапазонах темпоральных данных. Метод аппроксимирует сейсмические силы для отдельных нормальных компонентов колебательного процесса зданий и сооружений.

Затем мы выводим математические формулы спектрального метода. Абсолютное значение максимальных сейсмических сил при нормальных колебаниях составляет:

$$S_{ik} = \max_t |S_{ik}(t)| = m_k X_{ik} D_i \left(\frac{2\pi}{T_i} \max_t |I_i(t)| \right)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n)$$

Вводим обозначение:

$$C_W(T) = \max_t |W(t, T, \gamma)|. \quad (1)$$

Данная функция, которая выражает наибольшие ускорения генератора в зависимости от его собственного периода, называется спектром ускорения. Его графическая сигнатура представляет собой кривую спектрального ускорения. Спектры смещений и скоростей осциллятора вычисляются идентичным способом.

С учётом инерционных сил (1) будет переписано в следующем виде:

$$S_{ik} = m_k X_{ik} D_i C_W(T_i)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n)$$

Таким образом, максимальные инерционные силы отдельных нормальных составляющих сейсмических колебаний выражаются с использованием спектра ускорения. В этом ключе спектр ускорений можно будет рассматривать как главную инженерно-техническую характеристику сейсмического воздействия.

Заменим теперь в выражении (2) массы m_k сосредоточенными грузами Q_k по соотношению

$$m_k = \frac{Q_k}{g}, \quad (3)$$

где g – гравитационная сила. Кроме этого введем обозначения:

$$\eta_{ik} = X_{ik} D_i; \quad (3)$$

$$\frac{C_W(T)}{g} = K_c \beta_i. \quad (4)$$

Описанные выше математические выражения являются ключевыми для существующих строительных норм и правил. Они определяют сосредоточенные сейсмические силы дискретного контура, соответствующие i -й нормальной составляющей. β_i



называется динамическим коэффициентом, а η_{ik} - коэффициентом формы, K_c - коэффициентом сейсмичности. Включим значение D_i , заменив в нем грузы m_k пропорционально величинам Q_k . Тогда для коэффициента вида получаем выражение

$$\eta_{ik} = X_{ik} \frac{\sum_{v=1}^n Q_v X_{iv}}{\sum_{v=1}^n Q_v X_i^2} \quad (5)$$

Как показано, указанный коэффициент выводится только формой собственного колебания и локализацией груза Q_k в отмеченной расчётной схеме.

Оновываясь на спектральных кривых, можно определять инерционные силы для систем с распределёнными параметрами. Максимальная интенсивность распределённых инерционных сил i -го нормального компонента может быть представлена как

$$S_i(x) = \max_t |S_i(x, t)| = K_c \beta_i \eta_i(x) q(x) \quad (6)$$

Здесь $q(x)$ – это интенсивность вертикальной конфигурации сил. Коэффициент собственной формы в данном случае определяется формулой

$$\eta_i(x) = X_i(x) D_i = X_i(x) \frac{\int_0^h q(x) X_i(x) dx}{\int_0^h q(x) X_i^2(x) dx} \quad (7)$$

где h – высота рассматриваемого сооружения.

Из описанных выше математических выражений видно, что спектры реакции отдельных землетрясений можно определить по инструментальным акселерограммам. Они также могут быть получены из альтернативных сейсмометров, которые напрямую регистрируют максимальные ускорения осцилляторов с разными периодами и формами. Рассчитанный спектр реакции может быть получен путём совокупного обобщения спектров отдельных землетрясений, характерных для конкретного района. Мы предполагаем, что по мере накопления информационных данных сейсмометров можно будет построить уточненные спектральные кривые для каждого отдельно взятого района.

Сейсмическое нагружение однако, не является случайным процессом, поэтому могут быть изменения в спектральном составе акселерограмм. Кроме того, проектирование зданий и сооружений с системами сейсмозащиты основывается на второй группе предельных состояний.

Для практического применения отмеченных выше теоретических положений, было смоделировано высотное здание с ядром жесткости. Skyscraper имеет 40 уровней и $h=123$ м. Численный аналог строения создано в среде в среде ЛИРА САПР 2021 R2.

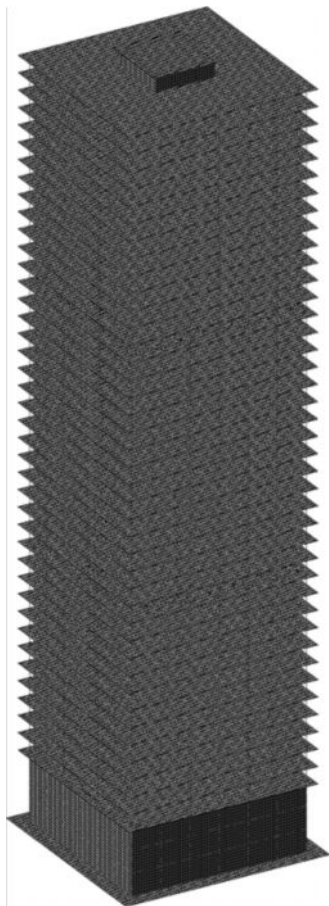


Рис.1. 3D модель здания

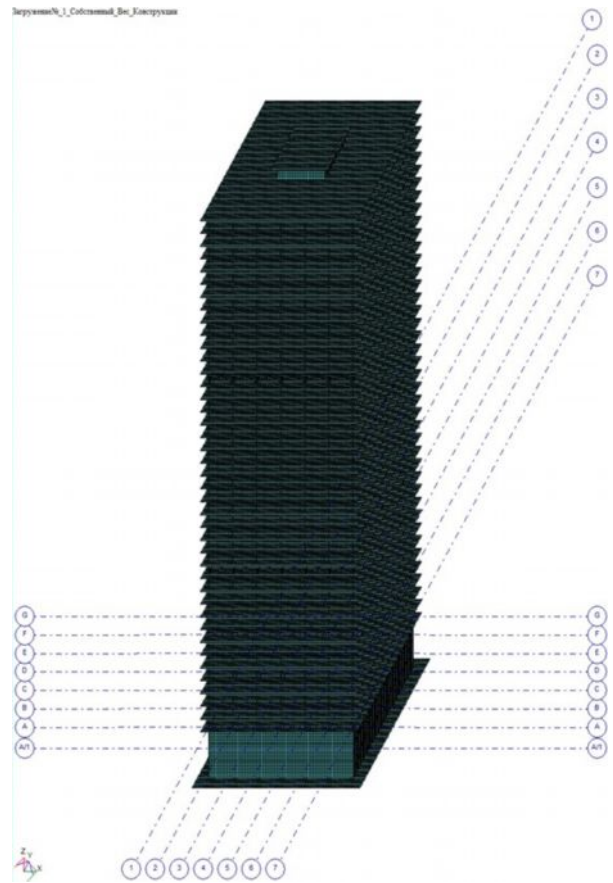


Рис.2. Конечно-элементная модель здания

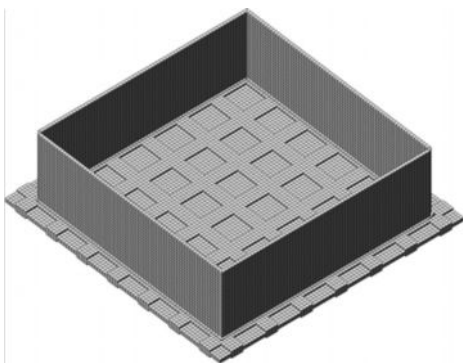


Рис.3. Подпорная стенка в сочетании с фундаментом



Рис.4. Фундаментная плита

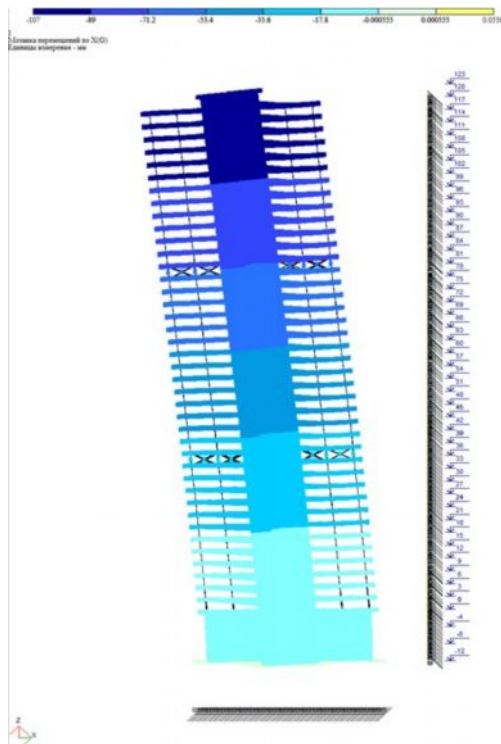


Рис. 5. Перемещения структурного ядра от сейсмического нагружения по X

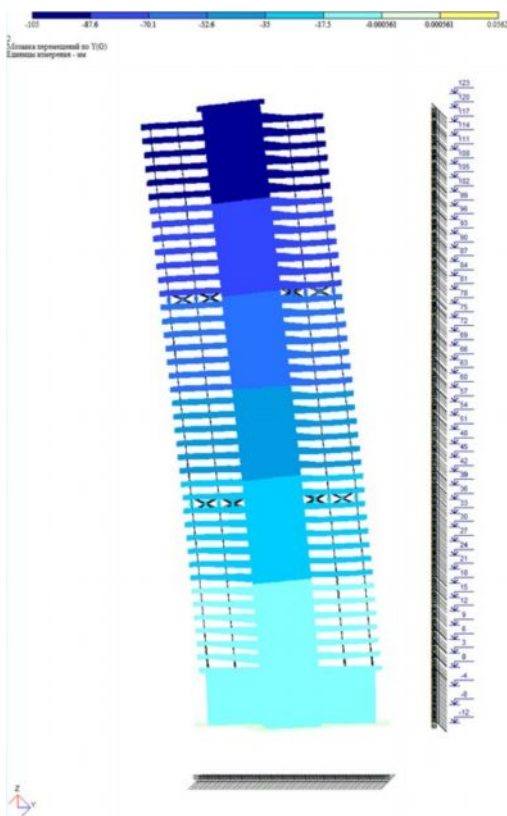


Рис. 6. Перемещения структурного ядра от сейсмического нагружения по Y

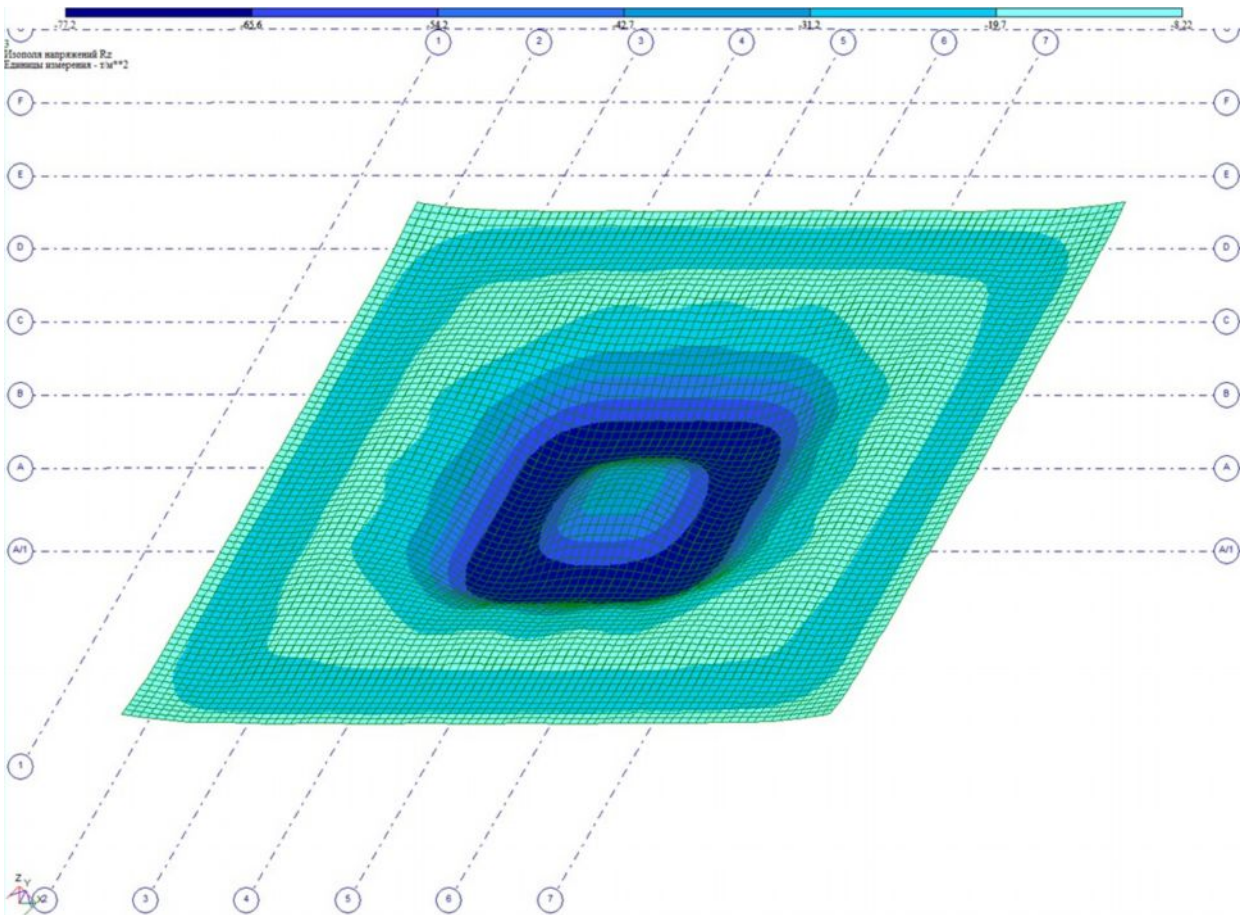


Рис.7. Деформации сплошной фундаментной плиты структурного ядра

Ниже представлены графики изменения смещения, ускорения, скорости и силы трения в результате расчёта с доминирующей частотой $f_1 = 3,91$ Гц.

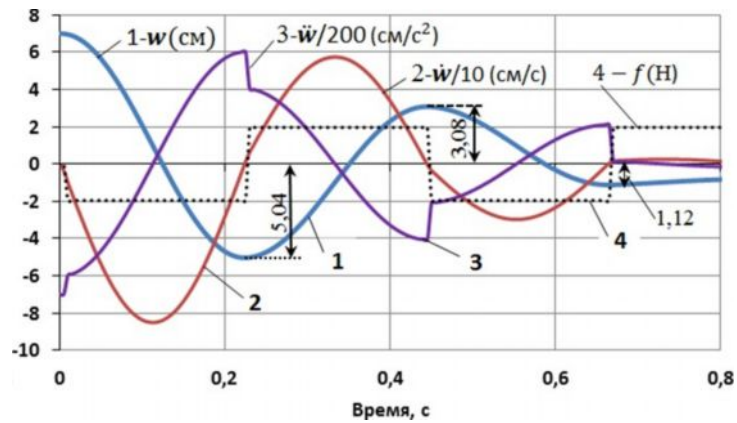


Рис. 8. Зависимость перемещений
1 – перемещения; 2 – V ; 3 – акселерация; 4 – μ

На рис. 9 показана визуализация результатов численных изысканий, где можно сделать вывод о том, что с ростом частотных параметров сейсмической волны и при $\mu=0,15$ амплитудно-частотные характеристики колебаний уменьшаются.

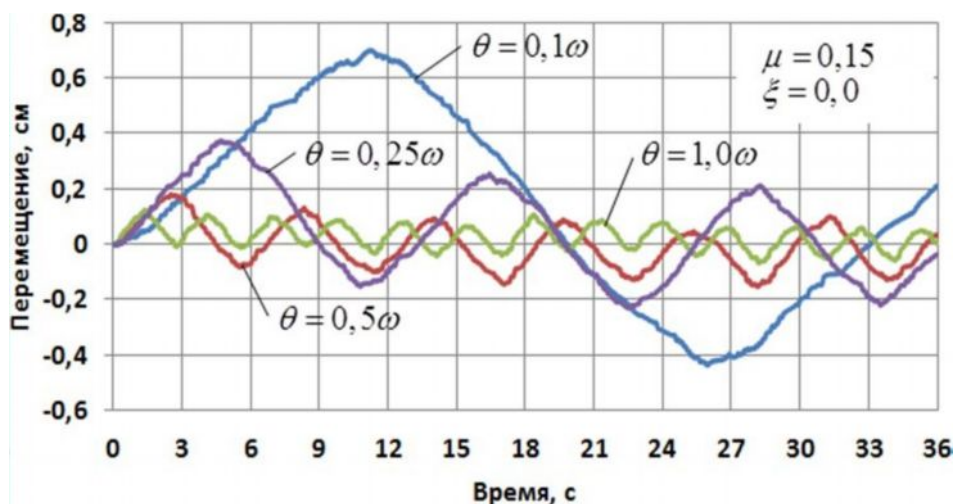


Рис. 9. Forced вибрации

Смоделированные здания подвергли динамическому анализу с амплитудно-частотными характеристиками собственных колебаний $f_{s1} = 0,2638$ Гц; $f_{s2} = 0,2662$ Гц; $f_{s3} = 0,3023$ Гц.

Структурный анализ смоделированного здания доказывает эффективность практики применения активного противодействия сейсмическим силам для высотных зданий, а именно гистерезисного демпфирования динамических усилий. Резистентность зданий с гистерезисным демпфированием к сейсмическим усилиям повышается в диапазоне от 23 % до 30 %.

Список литературы

1. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21769507>
2. <https://dlib.rsl.ru/viewer/01000278399#?page=1>
3. Попова Ж.С. К сейсмоизоляции многоэтажного здания резинометаллическими опорами [Текст] / Ж.С. Попова, Хе Сун Пак, А.А. Шишкина, А.Д. Ловцов // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. - 2013. - № 1. С. 223—228.
4. Мкртычев О.В. Сравнительный анализ реакций многоэтажных железобетонных зданий с системой сейсмоизоляции и без нее на сейсмическое воздействие [Текст] / О.В.Мкртычев, А.А.Бунов // 21 век: фундаментальная наука и технология.: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. - М.: 2014. - Т. 3. - С. 122—126.
5. Муравьев Н.П. Современный метод сейсмоизоляции зданий на примере РМО [Текст] / Н.П.Муравьев // Дальний Восток: проблемы развития архитектурностроительного комплекса. - 2013. - № 1. С. 212—218.
6. Румянцев Е.В. Моделирование конструкций железнодорожного терминала станции Адлер с учетом системы сейсмоизоляции [Текст] / Е.В.Румянцев Е.А.Белугина // Инженерно-строительный журнал. - 2012. - № 1 (27). - С. 22—30.
7. Харланов В.Л. Численное исследование сейсмоизолированных систем [Электронный ресурс] / В.Л.Харланов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строит. информатика. - 2008. - Вып. 3 (6). Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru>.
8. Айзенберг Я.М. Методические рекомендации по проектированию сейсмоизоляции с применением резинометаллических опор [Текст] / Я.М.Айзенберг, В.И.Смирнов, Р.Т.Акбиев. - М.: РАСС, 2008. 46 с.
9. Арутюнян А.Р. Современные методы сейсмоизоляции зданий и сооружений [Текст] / А.Р.Арутюнян // Инженерностроительный журнал. - 2010. - № 3 (13). - С. 56—60.



10. Ормонбеков Т.О. Применение тонкослойных резинометаллических опор для сейсмозащиты зданий в условиях территории Кыргызской Республики [Текст] / Т.О. Ормонбеков, У.Т. Бегалиев, А.В. Дерев, Г.А. Максимов и др. - Бишкек: Учкун, 2005. - 215 с.

11. Earthquake engineering handbook / ed. by W.F. Chen, Ch. Scawthorn; Hawaii University. CRC Press LLC, 2003. 1450 p.

12. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст]: пер. с англ. / К.Бате, Е.Вильсон. - М.: Стройиздат, 1982. - 448 с.

13. Hughes N.J.R., Rister K.S., Taylor R.L. Implicit-explicit finite elements in nonlinear transient analysis // Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 1979. № 17—18. Pp. 159—182.

14. Мкртычев О.В., Бунов А.А. Сравнительный анализ работы сейсмоизоляции зданий в виде резинометаллических опор на двухкомпонентную акселерограмму [Текст] / О.В.Мкртычев, А.А.Бунов // Наука и образование в современной конкурентной среде.: материалы Междунар. науч.-практ. конф. - Уфа.: РИО ИЦИПТ, 2014. - Ч. II. - С. 117.