

УДК 699.841

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-23-37>



Сейсмоизоляция модульных железобетонных зданий

А.Х. Попов ¹, В.А. Тарасов ¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)
ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург 195251, Российская Федерация

✉ e-mail: vtarasov1000@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является разработка конструктивного решения, обеспечивающего сейсмостойкость модульного здания в районе с сейсмичностью 9 баллов по шкале MSK-64.

Методы. В исследовании используется конечно-элементная расчетная модель здания со ствольной-модульной конструктивной системой с железобетонными модулями. Для анализа применяются численные методы с использованием конечно-элементной модели в ANSYS, SCAD. В комплексе SCAD создана единая расчетная модель всего здания, включающая монолитную часть, модульную часть и соединения между модулями. Межмодульные соединения моделировались специальными элементами с конечной жесткостью. Жесткость межмодульных соединений была определена с помощью конечно-элементной модели из объемных элементов в комплексе ANSYS, по этой же модели анализировались напряжения в соединениях. Учитывались все нагрузки нормальной эксплуатации здания, а также сейсмическая нагрузка по действующим нормам РФ для г. Владикавказ. Рассматривалось линейное упругое поведение материала конструкций. В ходе расчетов исследуются интенсивность армирования в несущих конструкциях здания, распределение напряжений в самом нагруженном межмодульном соединении.

Результаты. Результаты расчетов показывают, что применение сейсмоизоляции значительно уменьшает влияние сейсмического воздействия на здание, снижая интенсивность армирования до 55% (более чем в 2 раза) в монолитной части и до 60% – в модульной части по сравнению с аналогичным зданием без системы сейсмоизоляции. Так же была предложена конструкция усиленного межмодульного соединения, использование которой обеспечивает выполнение условий прочности при сейсмическом воздействии.

Заключение. Исследование качественно показало, что использование системы сейсмоизоляции позволяет достичь необходимого уровня сейсмостойкости модульных железобетонных зданий без изменения типовых конструктивных решений модулей. Данное исследование имеет важную практическую пользу, которая заключается в подготовке расчетной базы для строительства зданий из железобетонных модулей в сейсмоактивных районах. На следующих этапах исследования необходимо учесть возможность работы межмодульных соединений за пределами упругости, а также учесть существенно нелинейное поведение слайдерных сейсмоизоляторов для получения более корректной количественной оценки результатов сейсмических расчетов сейсмоизолированного модульного здания.

Ключевые слова: модульное здание; сейсмоизоляция; сборная железобетонная конструкция; сейсмическое воздействие; динамический расчёт; интенсивность армирования.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Попов А.Х., Тарасов В.А. Сейсмоизоляция модульных железобетонных зданий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 23-37. [https://doi.org/ 10.21869/ 2223-1560-2025-29-4-23-37](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-23-37).

Поступила в редакцию 18.07.2025

Подписана в печать 03.09.2025

Опубликована 22.12.2025

Seismic isolation of modular reinforced concrete buildings

Andrey Kh. Popov ¹, Vladimir A. Tarasov ¹ ✉

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)
29, Polytechnicheskaya str., St. Petersburg 195251, Russian Federation

✉ e-mail: vtarasov1000@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of this research is to develop a constructive solution that ensures the earthquake resistance of a modular building in an area with a seismicity of 9 points on the MSK-64 scale.

Methods. The research uses a FEM computational model of a building with a modular structural system with reinforced concrete modules. Numerical analysis was performed using finite element modeling (FEM) in ANSYS and SCAD. A single computational model of the entire building was developed in SCAD, incorporating the monolithic part, modular part, and inter-module connections. The inter-module connections were modeled using special finite-stiffness elements. The stiffness of inter-module connections was determined through a 3D finite element model in ANSYS, which was also used to analyze stress distribution in the connections. The model accounted for all operational loads. In addition seismic loads were used, in compliance with valid Russian design codes for Vladikavkaz. The analysis assumed linear elastic material behavior for all structural components. During the calculations, the intensity of reinforcement in the building's load-bearing structures and the stress distribution in the most loaded inter-module joint are investigated.

Results. The calculation results show that the use of seismic insulation significantly reduces the impact of seismic effects on the building, reducing the intensity of reinforcement to 55% (by more than 2 times) in the monolithic part and up to 60% in the modular part compared to a similar building without a seismic insulation system. Additionally, a reinforced inter-module connection design was proposed, which ensures compliance with strength requirements under seismic loading.

Conclusion. This study demonstrates that the required level of earthquake resistance is achieved because of the use of a seismic insulation system, thus, constructive solutions can be preserved. This study has an important practical benefit, which consists in preparing the calculation base for the construction of prefabricated modular reinforced concrete buildings in seismic areas. In subsequent research phases, it is necessary to account for the post-elastic behavior of inter-module connections, and the strongly nonlinear response of sliding seismic isolators. This will enable more accurate quantitative assessment of seismic performance calculations for modular buildings with base isolation systems.

Keywords: modular building; seismic isolation; prefabricated reinforced concrete structure; seismic impact; dynamic analysis; reinforcement intensity.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Popov A. Kh., Tarasov V. A. Seismic isolation of modular reinforced concrete buildings. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 23-37 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-23-37>.

Received 18.07.2025

Accepted 03.09.2025

Published 22.12.2025

Введение

В качестве объекта исследования принято 10-этажное жилое здание. В качестве конструктивной системы здания была выбрана ствольно-модульная конструктивная система. Материал модулей – железобетон. В ствольно-модульной конструктивной системе ствол (или ядро жёсткости) играет важную роль в пространственной устойчивости конструкции, а также в объёмно-планировочных решениях, так как в нём размещаются лестницы, лифты и вертикальные коммуникации. Вокруг ствола устанавливаются объёмные железобетонные модули. Рассматриваемое здание условно можно разделить на две части: модульную и монолитную. В монолитную часть здания входят: подземный этаж, первый этаж, лестнично-лифтовой узел. К модульной части относятся железобетонные модули, которые имеют соединения между собой в виде специальных стальных межмодульных соединений.

В современном мире модульное строительство становится более востребованным. В мегаполисах, в крупных городах проводится реновация жилых кварталов, застроенных в период 60-80-х годов прошлого века панельными зданиями, срок эксплуатации которых истёк.

В процессе реновации возводят современные модульные здания. При этом реновация крупных жилых массивов имеет обоснованную экономическую эффективность. На сегодняшний день наблюдается значительный рост строительства сборных зданий.

Существует множество научных исследований, которые посвящены конструктивным решениям и расчётам модульных зданий. Расчёты на сейсмическое воздействие модульных зданий рассматриваются в научных статьях [1-9] зарубежных авторов, но отечественных исследований по данной тематике проведено не было. Согласно статье [10] показано, что отсутствуют нормативные документы, регламентирующие методику расчёта модульных зданий. Перспективы строительства модульных зданий были рассмотрены в следующих статьях [11-13]. Важным аспектом при проектировании модульных зданий является соединения между модулями и внутримодульные соединения, поэтому теме модульных соединений посвящено множество научных работ, в том числе следующие статьи [14-20]. Исследования, связанные с моделированием модульных зданий освещены широким кругом работ [19-25].

Цель исследования – предложить конструктивное решение, обеспечивающее сейсмостойкость модульного здания в районе с сейсмичностью 9 баллов по шкале MSK-64.

Задачи исследования:

1. Выполнить прочностной расчёт модульного здания с учётом сейсмического воздействия без использования систем сейсмоизоляции.
2. Предложить различные системы сейсмоизоляции и провести расчётные обоснования сейсмостойкости модульного здания с сейсмоизоляцией.
3. Оценить влияние различных систем сейсмоизоляции на интенсивность армирования модульного здания.
4. Выполнить расчёт самого нагруженного межмодульного соединения, предложить вариант конструктивного усиления.

Объект исследования: 10-этажное здание со ствольно-модульной конструктивной системой.

Предмет исследования: методы повышения уровня сейсмостойкости модульных зданий.

Актуальность: система сейсмоизоляции позволяет достичь требуемого уровня сейсмостойкости здания при сохранении его конструктивных решений. Принцип строительства зданий из сборных железобетонных модулей заключается в типизации конструктивных решений. Однако сейсмическое воздействие вызывает многократное увеличение нагрузки на здание, что не позволяет использовать типовую конфигурацию мо-

дулей. Выявлено отсутствие отечественной нормативной базы, которая описывала и регулировала бы методику и принцип расчёта зданий данного типа.

Материалы и методы

Методы исследования – проведение вычислительных экспериментов (численное моделирование с последующим расчётом). Было выдвинуто предположение о том, что активная сейсмоизоляция в виде слайдерных сейсмоизолирующих опор позволит снизить интенсивность армирования в сборных панелях, из которых состоят железобетонные модули. Значения интенсивности армирования в расчётной схеме с использованием сейсмоизоляторов должно быть такими, чтобы каждый элемент расчётной схемы мог быть заармирован по нормам соответствующего свода правил.

Использовались аттестованные и апробированные расчётные комплексы SCAD версии 21, реализующий метод конечных элементов для задач строительного проектирования, и ANSYS, реализующий метод конечных элементов для решения общих задач механики деформируемого тела. Обоснованность результатов обеспечивается использованием общепринятых допущений строительной механики, теории упругости и динамики сооружений, теории сейсмостойкости, а также апробированные исследования других авторов по данному направлению.

В табл. 1 включены основные данные относительно объекта исследова-

ния, которые приняты в качестве исходных данных.

На рис. 1 показаны монолитные конструкции здания. На рис. 2 изображена модульная часть здания.

В качестве соединений модулей были использованы специальные соединения, выполненные из стали марки С440. Были включены в расчётную модель вертикальные и горизонтальные межмодульные соединения.

Нагрузка с вышележащих модулей передаётся на нижележащие через верти-

кальные соединения, которые представляют собой двутавры с рёбрами жёсткости, располагающимися по всей длине соединения. 3д вид вертикального межмодульного соединения представлен на рис. 3.

Следующим этапом была вычислена жёсткость данного соединения. В программном комплексе ANSYS была создана модель соединения из объёмных конечных элементов. После проведения расчёта были получены 6 значений жёсткостей в различных направлениях.

Таблица 1. Основные характеристики объекта исследования

Table 1. Main characteristics of the object of research

	Параметр / Parameter	Описание / Description	Примечание / Note
1	Местоположение объекта строительства	г. Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания	—
2	Расчётная сейсмичность	9 баллов	В соответствии с картой ОСП-2015-В СП14.13330.2018
3	Конструктивная система	Ствольно-модульная	Ствол обеспечивает дополнительную горизонтальную жёсткость, что приводит к увеличению устойчивости здания к воздействию горизонтальных нагрузок
4	Элементы из монолитного ж/б	Фундаментная плита, конструкции подземного этажа, конструкции первого этажа, лестнично-лифтовой узел, выход на кровлю	Пространственная жесткость обеспечивается жестким соединением элементов между собой, а также жёсткостью самих элементов
5	Элементы из сборного ж/б	Конструкции типовых этажей, парапеты	Сборные элементы имеют специальные межмодульные соединения

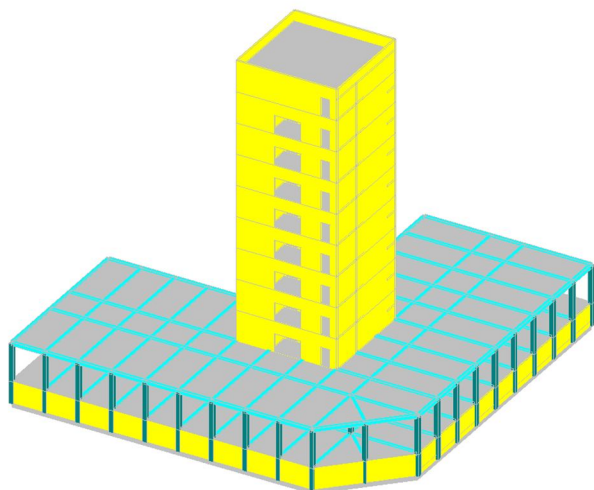


Рис. 1. Монолитная часть здания

Fig. 1. Monolithic part of the building

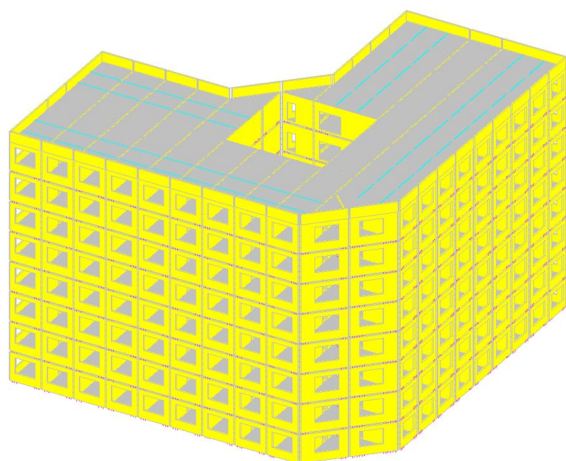


Рис. 2. Модульная часть здания

Fig. 2. Modular part of the building

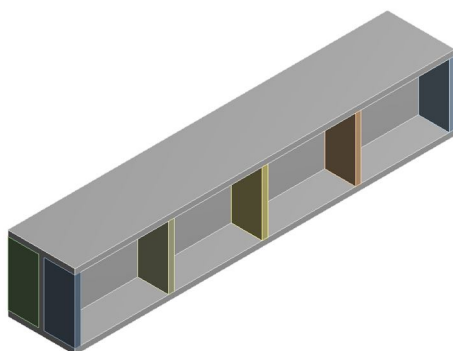


Рис. 3. 3д вид вертикального соединения модулей

Fig. 3. 3d view of the vertical connection in prefabricated modules

Общий вид типовых модулей рассчитываемого здания приведён на рис. 4.

Общий вид рассчитываемого здания приведён на рис. 5.

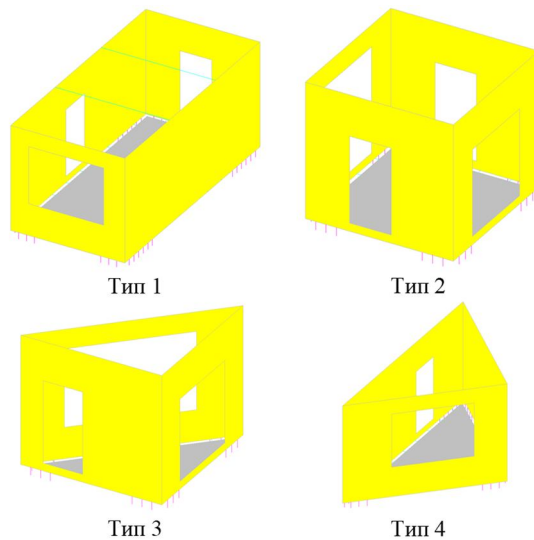


Рис. 4. 3д вид типовых модулей в расчётной модели

Fig. 4. 3d view of standard modules in structural analysis model

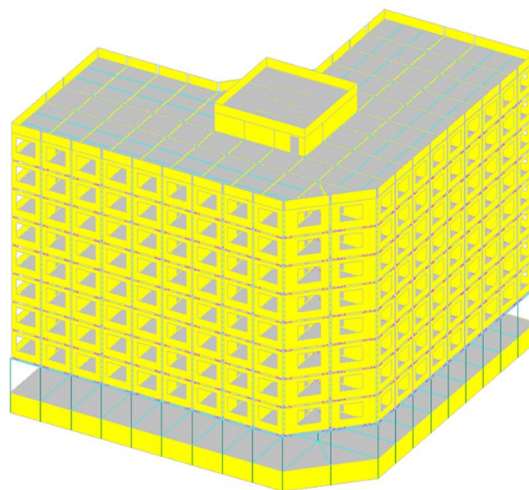


Рис. 5. Общий вид здания

Fig. 5. General view of the building

Сейсмоизоляторы размещаются на дополнительной фундаментной плите. Под опорами устраиваются специальные железобетонные постаменты, которые передают нагрузку с сейсмоизолятора на дополнительную фундаментную

плиту. Для определения необходимого количества сейсмоизоляторов, а также для обеспечения равномерной осадки здания (для пружинных элементов) производится специальный расчёт. Исходными данными для данного расчёта являются жёсткостные характеристики используемых сейсмоизоляционных опор, вес конструкций, располагающихся выше сейсмоизоляторов. Применение сейсмоизоляционных опор с низкой жёсткостью в горизонтальных направлениях приводит к снижению частот низших форм колебаний, смещая их из пика сейсмического спектра, в то время как применение вязких демпферов или сухого трения в опорах приводит к увеличению затуханий в слое сейсмоизоляции. Таким образом, уменьшаются амплитуды колебаний.

В работе рассмотрены 4 расчётные модели здания, в которых приняты одинаковые геометрические и жесткостные характеристики монолитных и модульных конструкций:

- Модель №1 – Модель без сейсмоизоляции;
- Модель №2 – Модель с пружинно-демпферной сейсмоизоляцией;
- Модель №3 – Модель со слайдерной сейсмоизоляцией;
- Модель №4 – Модель со слайдерной сейсмоизоляцией и межмодульными соединениями повышенной жесткости.

Результаты и их обсуждение

После проведения вычислительных экспериментов с моделями №1,2 и 3 бы-

ли получены изополя армирования конструкций, максимальные значения которых представлены в табл. 2. Значения усилий в специальных конечных элементах выражены в тоннах силы. Значения усилий представлены для самого нагруженного соединения.

Как видно из табл. 2, использование как пружинно-демпферной, так и слайдерной системы сейсмоизоляции привело к уменьшению расчётного армирования во всех конструкциях моделей.

Однако в расчётной модели с пружинно-демпферной системой сейсмоизоляции (модель №2) расчётное армирование не было снижено в достаточной степени. Значительное снижение армирования было достигнуто в монолитных конструкциях здания: армирование в монолитном железобетонном фундаменте сократилось на 40%, в вертикальных конструкциях подвала на 25%, в стенах лестнично-лифтового узла на 30%. В то же время, в сборных конструкциях модулей расчётное армирование снизилось незначительно: в стенах модулей армирование сократилось на 20%, в сборных плитах типовых модулей на 14%. В сборных вертикальных панелях модулей присутствуют элементы, в которых подбор арматуры не был произведён. То есть, условие прочности данных элементов не было выполнено. Усилия в специальных конечных элементах, с помощью которых были замоделированы стальные соединения модулей, снизились лишь на 13% (по направлению X).

Таблица 2. Сравнительный анализ результатов расчётов армирования железобетонных конструкций и прочности стальных соединений для моделей №1, №2, №3

Table 2. Comparative analysis of the calculation results for reinforcement in reinforced concrete structures and strength of steel joints in models №1, №2, №3

Вид армирования / Type of reinforcement	Модель №1 / Model No. 1	Модель №2 / Model No. 2	Модель №3 / Model No. 3	Разница между моделями №1 и №2, % / Difference between models No. 1 and No. 2, %	Разница между моделями №1 и №3, % / Difference between models No. 1 and No. 3, %
Расчётное армирование, см ² /м / Железобетонная монолитная фундаментная плита					
AS1	45,4	25,8	20,2	43,2	55,6
AS2	45,8	29,8	20,3	35,0	55,6
AS3	40,5	24,5	18,8	39,6	53,5
AS4	46,4	31,7	22,5	31,6	51,4
Расчётное армирование, см ² /м / Стены лестнично-лифтового узла					
AS1	13,2	9,9	8,0	25,3	39,6
AS2	26,6	20,4	16,5	23,5	37,9
AS3	12,2	8,6	6,8	29,6	44,6
AS4	26,3	19,0	16,1	27,5	38,7
Расчётное армирование, см ² /м Стены типовых модулей нижнего этажа					
AS1	9,9	8,2	2,8	17,1	72,0
AS2	29,4	24,6	7,2	16,1	75,4
AS3	7,6	6,1	2,5	19,9	67,1
AS4	22,8	19,0	7,0	16,6	69,3
Расчётное армирование, см ² /м / Плиты типовых модулей					
AS1	3,7	3,4	2,2	8,6	40,3
AS2	3,8	3,2	1,9	13,9	49,3
AS3	3,2	3,2	2,8	0,0	31,8
AS4	3,4	3,4	1,9	0,6	45,3
Внутренние усилия в стальных соединениях модулей, тс					
R _x	61,8	53,6	28,9	13,2	53,2
R _y	57,5	56,2	26,3	2,2	54,2
R _z	216,6	134,2	191,0	38,0	11,8

Условие прочности для стальных межмодульных соединений не удовлетворено. Можно сделать вывод, что пружинно-демпферная система сейсмоизоляции не позволила в достаточной степени сократить расчётное армирование и уменьшить значения усилий в стальных межмодульных соединениях.

Результаты расчёта модели №3 демонстрируют значительное снижение армирования благодаря внедрённой в структуру здания слоя сейсмоизоляции со слайдерными опорами. Слайдерные сейсмоизоляторы оказались более эффективными, позволили значительно снизить расчётное армирование в монолитной и в модульной частях здания. В фундаментной плите применение сейсмоизоляции привело к снижению интенсивности армирования на 55% (более чем в 2 раза), в вертикальных конструкциях подвала – на 50% (в 2 раза), в лестнично-лифтовом узле на 45%. В стеновых панелях модулей армирование сократилось на 75% (более чем в 3 раза), в сборных типовых плитах – на 49% (армирование AS2).

Подбор армирования был выполнен для 100% элементов модели. Результаты интенсивности армирования наглядно показали, что при применении слайдерных опор в качестве системы сейсмоизоляции можно сохранить типовые конструктивные решения модулей. Монолитные конструкции здания также не требуют изменений.

Значения усилий в стальных межмодульных соединениях в горизонтальных направлениях X, Y уменьшились более чем в 2 раза (53% в направлении X, 54% в направлении Y). Однако усилия в вертикальном направлении Z уменьшились только на 12%. То есть, слайдерные опоры неэффективно изолируют здание в вертикальном направлении. Данное явление объясняется тем, что слайдерные сейсмоизоляторы имеют большую вертикальную жёсткость, в связи с этим, сложно добиться снижения усилий в вертикальном направлении. В межмодульном соединении условие прочности не обеспечено. Чтобы условие прочности было обеспечено, необходимо изменить конструкцию соединения.

Были внесены изменения в конструкцию межмодульного соединения. Были добавлены дополнительные рёбра жёсткости. Геометрия изменённого соединения представлена на рис. 6.

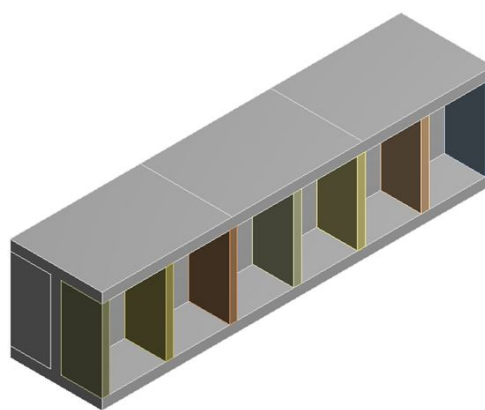


Рис. 6. 3д вид межмодульного соединения с дополнительными рёбрами жёсткости

Fig. 6. 3d view of the inter-module connection with additional stiffeners

Распределение напряжений в самом нагруженном стальном межмодульном соединении представлено на рис. 7. На соединение были приложены нагрузки из расчёта модели №3.

По данным результата расчёта были зафиксированы максимальные напряжения: $\sigma_{max} = 4,250 \cdot 10^8 \text{ Па} = 425 \text{ МПа}$. Наи-

большее значение напряжений не превышает расчётное сопротивление стали С440, которая была задана для стальных соединений в модели №1. Таким образом, введя дополнительные рёбра жёсткости, получилось удовлетворить условие прочности для самого нагруженного межмодульного соединения.

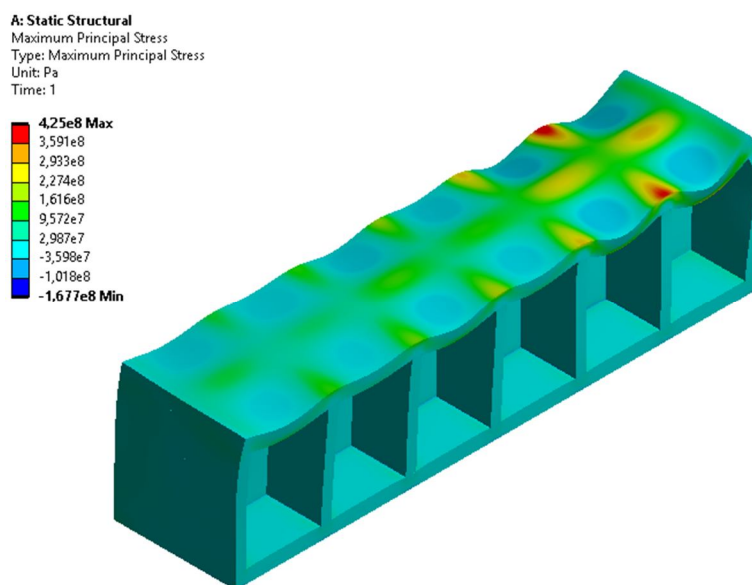


Рис. 7. Распределение напряжений в межмодульном соединении с дополнительными рёбрами жёсткости

Fig. 7. Stress distribution in the inter-module connection with additional stiffeners

В связи с изменением конструкции межмодульных соединений изменилась их жёсткость, а значит изменилась и общая жёсткость здания, что влечёт за собой изменение частот собственных форм колебаний модульного здания. Анализ результатов расчета модели №4 (модель со слайдерной сейсмоизоляцией, с изменёнными жесткостями межмодульных соединений) показал следующее: расчётное армирование монолитных конструкций здания не измени-

лось (если сравнивать с моделью №3). Следовательно, изменение в конфигурации межмодульных соединений не повлияло на армирование монолитных конструкций.

Однако увеличение жёсткости из-за внесённых изменений в конструкцию межмодульных соединений повлияло на интенсивность армирования стен объёмных модулей. Расчётное армирование AS1 уменьшилось на 60% по сравнению с моделью №1 без сейсмоизоляции

(72% в модели до изменений в конструкции соединений), расчётное армирование AS2 уменьшилось на 69% (75% в модели до изменений в конструкции соединений). В плитах типовых модулей расчётное армирование не изменилось.

Изменения в конфигурации соединений привели к незначительному увеличению усилий в горизонтальном и в вертикальном направлениях по сравнению с моделью без модификации соединений (модель №3). Условие прочности в межмодульном соединении с изменённой конфигурацией обеспечено. В соответствии с результатами расчёта требуется выполнить межмодульные соединения из стали марки С590, обладающей расчётным сопротивлением $R_y=540$ МПа.

Выводы

1. Расчёт модульного здания с учётом сейсмического воздействия без использования систем сейсмоизоляции показал невозможность расчетного обоснования сейсмостойкости здания с типовыми модулями при интенсивности землетрясения в 9 баллов по шкале MSK-64.

2. Рассмотрены варианты сейсмоизоляции модульного здания пружинно-демпферной изоляцией и слайдерной изоляцией. Введение в расчётную модель пружинно-демпферной сейсмоизоляции привело к значительному сокращению расчётного армирования (до 40%) в монолитных конструкциях здания. Однако данный вид сейсмоизоляции привел лишь к незначительному сокращению армиро-

вания в конструкциях модулей (до 20%). Для расчётного и конструктивного обоснования использования типовых модулей величина сокращения расчётного армирования недостаточна.

3. Результаты расчёта модели со слайдерной сейсмоизоляцией показали значительное сокращение расчётного армирования всех конструкций здания: до 55% в монолитных конструкциях и до 60% в конструкциях модулей. Для выбранного конструктивного исполнения модульного здания использование слайдерной сейсмоизоляции наиболее эффективно.

4. Предложена конструкция усиленного межмодульного соединения, которая удовлетворяет условие прочности в упругой стадии. Увеличение жесткости, из-за введения дополнительных стальных рёбер жёсткости в конструкцию межмодульных соединений, незначительно повлияло на требуемое армирование модулей (увеличение на 10-20% в сравнении с моделью №3 с неизменёнными межмодульными соединениями).

5. Предложенный и расчетно-обоснованный вариант сейсмоизоляции модульного здания позволяет спроектировать сейсмостойкое модульное здание в районах с высокой сейсмичностью.

На следующих этапах исследования планируется рассмотреть неупругое поведение межмодульных соединений с возможностью пластических деформаций, а также учесть нелинейное поведение слайдерных опор.

Список литературы

1. Bin Zhao, Di Wu, Huiqing Zhu. New modular precast composite shear wall structural system and experimental study on its seismic performance // *Engineering Structures*. August 2022. Vol. 264, P. 114381.
2. Seismic performance and design of precast concrete building structures: an overview / R. K. Khare, M. M. Maniyar, S.R. Uma, V. B. Bidwai // *Journal of Structural Engineering*. 2011. Vol. 38, no. 3. P.272-284.
3. Experimental and numerical investigations of bolted assembled joints to concrete encased CFST columns with different connection details / Lei Guo, Jingfeng Wang, Wanqian Wang, Zhihan Hu // *Journal of Constructional Steel Research*. 2023. Vol. 201. P. 107739.
4. Seismic resilience design of prefabricated modular pressurized buildings / Zhiwu Ye, Haifeng Bu, Zhimao Liu, Deng Lu, Dong Min, Hongbo Shan // *Resilient Cities and Structures*. 2025. Vol. 4, is. 1. P. 53-70.
5. Chen Wang, Peifeng Tian, Tak-Ming Chan. Seismic behavior of modular buildings with reinforced concrete (RC) structural walls as seismic force resisting system // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 315. P. 118378.
6. Sheng Li, Nelson Lam, Hing-Ho Tsang. Lateral stability design and modelling of high-rise fully modular buildings with superelastic tendon restrained rocking isolation // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 99. P. 111589.
7. Collapse Behavior and Resistance Mechanisms of Steel Modular Buildings with Corrugated Walls: Experimental, Numerical, and Analytical Insights / Jing-Zhou Zhang, Xiao Lin, Wen-Jin Zhang, Zhi-Wei Yu // *Thin-Walled Structures*. 2025. 113157.
8. Enhancing seismic resilience in modular steel building through three-dimensional isolation / Ze Mo, BingLin Lai, Ganping Shu, T.Y. Yang, Carlos E. Ventura, J.Y. Richard Liew // *Engineering Structures*. 2025. Vol. 323, part A. P. 119269.
9. Experimental study on the seismic performance of two-storey UHPC modular building structure / Qing-Feng He, Jun-Ming Zou, Chen-Feng Zhang, Yi Zhong, Jin-Shi Li, Wei-Jian Yi // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 97. P. 110966
10. Скляр С.Н., Овчинников И.И. Оценка состояния нормативной документации по расчету на землетрясения // *Инженерные исследования*. 2024. №4(19). С. 39-47. EDN: VTQGTGU
11. Крыжановский В.В. Модульные здания в современном строительстве // *Инженерные исследования*. 2023. №1 (11). С. 31-37. EDN: PQCATC
12. Richard Liew a J.Y., Chua Y.S.. Innovative modular systems for high-rise buildings // *Engineering Structures*. 2025. Vol. 323, part A. P. 119270.
13. Сауков Д. А., Гинзберг Л. А. Современное модульное строительство // *SAFETY2018*. Екатеринбург, 2018.
14. Chao Hou, Qi Qi, Jiahao Peng. Performance of inter-module connection with a pegged tenon for composite modular buildings with CFST columns // *Engineering Structures*. 2025. Vol. 329. P. 119824.

15. Seismic behavior of high-rise modular buildings with simplified models of inter-module connections / Feng-Wei Shi, Yang Ding, Liang Zong, Wei Pan, Yan Duan, Tian-Yao Ping // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 221. P. 108867.
16. Design and experimental study on seismic performance of RC modular superimposed shear walls with novel inter-module connection / Jiulin Bai, Biao Yang, Bin Xie, Jingwei Yang // *Engineering Structures*. 2025. Vol. 324. P. 119356.
17. Machine learning based multi-objective optimization on shear behavior of the inter-module connection / En-Feng Deng, You-Peng Du, Xun Zhang, Jun-Yi Lian, Zhe Zhang, Jun-Feng Zhang // *Thin-Walled Structures*. 2024. Vol. 205, part C. P. 112596.
18. Experimental study on seismic performance of new concrete modular structures with tie-rod inter-module connections / Hao Chen, Chao Yang, Haiyang Wang, Chao Li, Cong Li, Jinping Ou // *Structures*. 2025. Vol. 71. P. 107983.
19. Zhen Wang, Wei Pan, Yang Zhang. Parametric study on module wall-core system of concrete modular high-rises considering the influence of vertical inter-module connections. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 241. P. 112436.
20. Experimental and numerical investigation of bolt-free preloaded connection for steel-framed modular buildings / Keunwoo Lee, Bong-Ho Cho, Kim J.R. Rasmussen, Dami Jung // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 220. P. 108827.
21. Comparative cradle to end-of-use embodied carbon analysis of high-rise concrete buildings using volumetric modular and panelized construction / Xiaohan Wu, Geoffrey Qiping Shen, Yue Teng, Rui Jiang // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 100. P. 111736.
22. Yang Zhang, Siwei Chen, Wei Pan. Systematic initial embodied carbon assessment of concrete modular high-rise residential buildings: A case in Hong Kong. *Building and Environment*. 2024. Vol. 265. P. 111917.
23. Comprehensive evaluation of flat pack modular building systems: Design, structural performance, and operational efficiency / Heshachanaa Rajanayagam, Valentina Beatini, Keerthan Poologanathan, Brabha Nagaratnam // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. P. 110099.
24. Huu-Tai Thai, Tuan Ngo, Brian Uy. A review on modular construction for high-rise buildings. *Structures*. 2020. Vol. 28. P. 1265-1290.
25. Vincent J.L. Gan. BIM-based graph data model for automatic generative design of modular buildings // *Automation in Construction*. 2022. Vol. 134. P. 104062.

References

1. Bin Zhao, Di Wu, Huiqing Zhu. New modular precast composite shear wall structural system and experimental study on its seismic performance. *Engineering Structures*. 2022; 264: 114381.
2. Khare R. K., Maniyar M. M., Uma S.R., Bidwai V. B. Seismic performance and design of precast concrete building structures: an overview. *Journal of Structural Engineering*. 2011; 38(3): 272-284.

3. Lei Guo, Jingfeng Wang, Wanqian Wang, Zhihan Hu. Experimental and numerical investigations of bolted assembled joints to concrete encased CFST columns with different connection details. *Journal of Constructional Steel Research*. 2023; 201: 107739.
4. Zhiwu Ye, Haifeng Bu, Zhimao Liu, Deng Lu, Dong Min, Hongbo Shan. Seismic resilience design of prefabricated modular pressurized buildings. *Resilient Cities and Structures*. 2025; 4(1): 53-70.
5. Chen Wang, Peifeng Tian, Tak-Ming Chan. Seismic behavior of modular buildings with reinforced concrete (RC) structural walls as seismic force resisting system. *Engineering Structures*. 2024; (315): 118378.
6. Sheng Li, Nelson Lam, Hing-Ho Tsang. Lateral stability design and modelling of high-rise fully modular buildings with superelastic tendon restrained rocking isolation. *Journal of Building Engineering*. 2025; 99: 111589.
7. Jing-Zhou Zhang, Xiao Lin, Wen-Jin Zhang, Zhi-Wei Yu. Collapse Behavior and Resistance Mechanisms of Steel Modular Buildings with Corrugated Walls: Experimental, Numerical, and Analytical Insights. *Thin-Walled Structures*. 2025; 113157.
8. Ze Mo, BingLin Lai, Ganping Shu, T.Y. Yang, Carlos E. Ventura, J.Y. Richard Liew. Enhancing seismic resilience in modular steel building through three-dimensional isolation. *Engineering Structures*. 2025; 323(A): 119269.
9. Qing-Feng He, Jun-Ming Zou, Chen-Feng Zhang, Yi Zhong, Jin-Shi Li, Wei-Jian Yi. Experimental study on the seismic performance of two-storey UHPC modular building structure. *Journal of Building Engineering*. 2024; 97: 110966.
10. Sklyarov S.N., Ovchinnikov I.I. Assessment of the status of normative documentation on earthquake design. *Inzhenernye issledovaniya = Engineering Research*. 2024; (4): 39-47. (In Russ.). EDN: VTQTGU.
11. Kryzhanovsky V.V. Modular buildings in modern construction. *Inzhenernye issledovaniya = Engineering Research*. 2023; (1): 31-37. (In Russ.). EDN: PQCATC
12. Richard Liew a J.Y., Chua Y.S. Innovative modular systems for high-rise buildings. *Engineering Structures*. 2025; 323(A): 119270.
13. Saukov D. A., Ginzberg L. A. Modern modular building. Safety of critical infrastructures and territories. In: *Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures: SAFETY2018*. Ekaterinburg; 2018. P. 69-82. (In Russ.)
14. Chao Hou, Qi Qi, Jiahao Peng. Performance of inter-module connection with a pegged tenon for composite modular buildings with CFST columns. *Engineering Structures*. 2025; 329: 119824.
15. Feng-Wei Shi, Yang Ding, Liang Zong, Wei Pan, Yan Duan, Tian-Yao Ping. Seismic behavior of high-rise modular buildings with simplified models of inter-module connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024; 221: 108867.
16. Jiulin Bai, Biao Yang, Bin Xie, Jingwei Yang. Design and experimental study on seismic performance of RC modular superimposed shear walls with novel inter-module connection. *Engineering Structures*. 2025; 324: 119356.

17. En-Feng Deng, You-Peng Du, Xun Zhang, Jun-Yi Lian, Zhe Zhang, Jun-Feng Zhang. Machine learning based multi-objective optimization on shear behavior of the inter-module connection. *Thin-Walled Structures*. 2024; 205(C): 112596.
18. Hao Chen, Chao Yang, Haiyang Wang, Chao Li, Cong Li, Jinping Ou. Experimental study on seismic performance of new concrete modular structures with tie-rod inter-module connections. *Structures*. 2025; 71: 107983.
19. Zhen Wang, Wei Pan, Yang Zhang. Parametric study on module wall-core system of concrete modular high-rises considering the influence of vertical inter-module connections. *Engineering Structures*. 2021; 241: 112436.
20. Keunwoo Lee, Bong-Ho Cho, Kim J.R. Rasmussen, Dami Jung. Experimental and numerical investigation of bolt-free preloaded connection for steel-framed modular buildings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024; 220: 108827.
21. Xiaohan Wu, Geoffrey Qiping Shen, Yue Teng, Rui Jiang. Comparative cradle to end-of-use embodied carbon analysis of high-rise concrete buildings using volumetric modular and panelized construction. *Journal of Building Engineering*. 2025; 100: 111736.
22. Yang Zhang, Siwei Chen, Wei Pan. Systematic initial embodied carbon assessment of concrete modular high-rise residential buildings: A case in Hong Kong. *Building and Environment*. 2024; 265: 111917.
23. Heshachanaa Rajanayagam, Valentina Beatini, Keerthan Poologanathan, Brabha Nagaratnam. Comprehensive evaluation of flat pack modular building systems: Design, structural performance, and operational efficiency. *Journal of Building Engineering*. 2024; 95: 110099.
24. Huu-Tai Thai, Tuan Ngo, Brian Uy. A review on modular construction for high-rise buildings. *Structures*. 2020; 28: 1265-1290.
25. Vincent J.L. Gan. BIM-based graph data model for automatic generative design of modular buildings. *Automation in Construction*. 2022; 134: 104062.

Информация об авторах / Information about the Authors

Попов Андрей Харлампиевич, студент,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: popov.ah@edu.spbstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2054-8861>

Andrey Kh. Popov, Student, Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation,
e-mail: popov.ah@edu.spbstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2054-8861>

Тарасов Владимир Александрович, кандидат
технических наук, доцент ВШПИДС,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: vtarasov1000@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>

Vladimir A. Tarasov, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Higher School of Industrial,
Civil and Road Construction, Institute of Civil
Engineering, Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation,
e-mail: vtarasov1000@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>