



## Comparative analysis of the spatial rigidity of a multi-storey reinforced concrete frame building with foam aerated concrete walls and new frame-sheathing envelope structures

A.A. Khodjaev<sup>1</sup>, I.S. Karimjonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Ministry of Higher education, science and innovations, Uzbekistan

<sup>2</sup>Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

**Abstract:** A comparative analysis of the spatial rigidity of a multi-storey reinforced concrete frame building with foam aerated concrete walls and new frame-sheathing envelope structures (FSW) is presented based on dynamic calculation using the LIRA SOFT software package using the finite element method in the temperature, climatic and seismic conditions of Uzbekistan.

**Keywords:** Aerated concrete, wall, frame-sheathing wall (FSW), light steel thin-walled structures (LSTS), thermal profile, seismic resistance, energy saving, ecology, thermal insulation.

## Сравнительный анализ пространственной жесткости многоэтажного железобетонного каркасного здания с газобетонными стенами и новыми каркасно-обшивными ограждающими конструкциями

Ходжаев А.А.<sup>1</sup>, Каримжонов И.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Министерство Высшего образования, науки и инноваций, Узбекистан

<sup>2</sup>Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

**Аннотация:** Приведен сравнительный анализ пространственной жесткости многоэтажного железобетонного каркасного здания с газобетонными стенами и новыми каркасно-обшивными ограждающими конструкциями (КОС) на основе динамического расчета с помощью программного комплекса ЛИРА СОФТ методом конечных элементов в температурно-климатических и сейсмических условиях Узбекистана.

**Ключевые слова:** газобетон, стена, каркасно-обшивная стена (КОС), лёгкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК), термопрофиль, сейсмостойкость, энергосбережение, экология, теплоизоляция.

### 1. Введение


Обеспечение надежности и долговечности зданий и сооружений в условиях повышенной сейсмичности и деструктивных воздействий температурно-влажностных условий резко-континентального сухого жаркого климата во многом обусловлено конструктивными решениями объектов, строящихся на таких территориях.

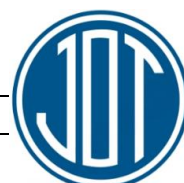
В настоящее время расчет зданий и сооружений на действие сейсмических нагрузок производится в соответствии с КМК 2.01.03-19 «Строительство в сейсмических районах», в основу которых заложено упругое деформирование конструкций с учетом податливости систем и образование пластических шарниров. Расчет прочности элементов производится по предельным усилиям, воспринимаемым элементом в нормальных, наклонных и пространственных сечениях. При этом вводятся специальные коэффициенты условий

работы, учитывающие особенности сейсмического воздействия. Расчет конструкций зданий и сооружений по указанному методу наглядно демонстрирует значение массы системы в общем контексте ее устойчивости при динамических воздействиях. Поэтому снижение массы здания является весьма актуальным для обеспечения его сейсмостойкости и наиболее правильного поведения здания при землетрясениях, обеспечивающего его лучшую надежность и в то же время экономичность проектных решений.

В условиях Узбекистана условие сейсмостойкости зданий обеспечивается на основе теории сейсмостойкого строительства и зависит от типа здания, территории застройки, внешней среды и других факторов. По мере увеличения высоты здания увеличивается и период его свободных (частных) колебаний. Обычно изменение периода свободных колебаний здания приводит к изменению реакции здания и соответствующих напряжений в верхних и нижних уровнях. Известно, что период доминирующей

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0000-5159-2972>

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0001-7326-6382>



вибрации землетрясения зависит от геологических условий местности вокруг очага и длится 0,1–2 секунды. Увеличение высоты здания (и, соответственно, периода колебаний) отдаляет его от доминирующего периода колебаний землетрясения, что обусловило принятие наиболее оптимальным для сейсмических районов зданий с высотой не более 15 этажей.

## 2. Основная часть

В настоящее время среди строящихся объектов городских территорий подавляющее большинство составляют многоэтажные железобетонные каркасные здания. Популярность такого типа зданий обусловлена прочностью и сейсмостойкостью их пространственной системы, возможностью практически безграничного проектирования и воплощения архитектурных решений, наличием сравнительных преимуществ по цене, отлаженностью технологий строительства и доступностью стройматериалов.

Как известно, несущая способность каркасных зданий обеспечивается пространственной работой железобетонного или металлического каркаса. При этом, в зависимости от заданных параметров и конструктивных решений здания, его пространственная жесткость обеспечивается соответствующими дополнительными связями, диафрагмами и сердечниками. В отдельных случаях диафрагмами жесткости служат также и ограждающие конструкции каркасных зданий, но все же их основная задача заключается в обеспечении функциональности архитектурной среды здания, создании условий для жизнедеятельности его инфраструктуры.

Сравнительный анализ многоэтажных железобетонных каркасных зданий со стенами различных конструкций с учетом их параметров дает возможность выявить наиболее оптимальные и приемлемые из них. С этой целью такой анализ проведен между традиционными, наиболее распространенными конструктивными решениями стен (кирпичные стены, стены из лёгких пористых ячеистых бетонов), а также новым предлагаемым конструктивным решением – каркасно-обшивные стеновые конструкции (КОС).

**Лёгкие пористые ячеистые бетонные блоки.** Ячеистые бетоны являются разновидностью легкого бетона. В процессе их производства образуется характерная "ячеистая" структура. Пористость ячеистого бетона можно регулировать, получая бетоны разной плотности и назначения. По назначению ячеистые бетоны делятся на три группы: конструкционные, конструкционно-теплоизоляционные, теплоизоляционные. Среди блоков из ячеистых бетонов наибольшее распространение получили пенобетонные и газобетонные блоки.

**Блоки из пенобетона.** Пенобетон изготавливается из цемента, песка, воды и пенообразователя. Изделия из пенобетона отличаются хорошие звуко- и теплоизоляционные свойства, малый вес. Материал является негорючим и не разрушается от воздействия высокой температуры. На свойства пенобетона оказывает большое влияние качество пенообразователя. В настоящее время в основном применяются

синтетические пенообразователи на основе органических соединений как отечественного, так и импортного производства. Изменяя соотношение составляющих пенобетонной смеси, можно получать пенобетон различной плотности (400–1800 кг/м<sup>3</sup>). С увеличением плотности растет прочность пенобетона, но падает сопротивление теплопередаче. Пенобетонные блоки применяют в качестве ограждающих конструкций в каркасных зданиях, а также как термовкладыши ограждающих конструкций многоэтажных жилых домов. В малоэтажном домостроении в качестве несущих конструкций используют блоки из пенобетона марок от Д500 и выше. В качестве теплоизоляции, как правило, применяют блоки марки Д400 [1].

**Блоки из газобетона.** Газобетон получают из вяжущего (цемента, извести), кварцевого песка, воды, с добавлением газообразующих веществ (благодаря чему мелкие воздушные поры распределяются равномерно). Именно поэтому строительные элементы из газобетона имеют малый вес и хорошие теплоизоляционные свойства. Газобетон относится к конструкционно-теплоизоляционным строительным материалам. Его применение для возведения ограждающих конструкций позволяет значительно уменьшить массу и толщину стен, что не только сокращает сроки и объем строительных работ, но и снижает стоимость строительства в связи с понижением массы здания и экономией на возведении фундамента. Конструкции из газобетона имеют более высокие теплофизические показатели в сравнении с блоками из тяжелых бетонов, керамическими и силикатными штучными материалами. Например, для устройства наружной стены достаточными являются блоки из пористого бетона толщиной 375 мм (плотностью 400 кг/м<sup>3</sup>).

Газобетон является негорючим материалом и может быть использован для всех классов противопожарной безопасности. Он не разрушается от воздействия высокой температуры и препятствует распространению огня. Благодаря своей структуре газобетон является морозостойким строительным материалом. Кроме того, газобетонные блоки легко обрабатываются (пилятся, сверлятся, фрезеруются, шпательются, гвоздятся), а также не подвергаются коррозии и не гниют. При одинаковой плотности прочность газобетона больше почти в 2 раза, чем прочность безавтоклавного пенобетона [1].

Особенностью газобетона как высокопористого материала являются высокая паропроницаемость и значительное водопоглощение. Поэтому в ограждающих конструкциях, выполненных из газобетонных блоков, необходимо обеспечить свободный транзит пара изнутри помещения наружу. Этого можно добиться устройством либо вентилируемого фасада, либо системы наружного утепления с применением финишного слоя с высокой паропроницаемостью. В случае невозможности устройства наружного утепления или высокой влажности внутри помещения, необходимо надежно защитить ограждающую конструкцию от проникновения пара изнутри (например, устройства с внутренней стороны пароизоляционной пленки) [1].

Преимуществами ячеистого бетона являются его низкая масса, сравнительная дешевизна (на 15–20 % дешевле обычного легкого бетона), доступность исходного сырья (песок и цемент), несложность механической обработки. К числу недостатков



относятся: значительное трещинообразование, пониженная морозостойкость, плохая связь с фактурными слоями, развитие коррозионных процессов в арматуре [2].

**Каркасно-обшивная стена (КОС)** — это многослойная комбинированная конструктивная система, состоящая из каркаса, материалов для утепления/звукоизоляции, заполняющих полость каркаса, обшивок стены (наружной и внутренней), крепежных элементов, пароизоляции и ветрозащиты, наружной облицовки (фасада), а также совокупности технических и технологических решений, определяющих правила и порядок установки этой системы в проектное положение.

**Наружные несущие КОС с каркасом из ЛСТК** — это ограждающие конструкции, воспринимающие нагрузку от собственного веса, ветровую и технологическую нагрузки и передающие их на несущие конструкции здания [3-5].

КОС — это перспективная, новая энергосберегающая технология, которая по праву может использоваться в жилом высотном домостроении. КОС позволит обеспечить энергосбережение за счет применения эффективного утеплителя и термопрофиля с прорезями, увеличивающими путь теплового потока и как следствие — сопротивление теплопередаче, а также снизит материальные, трудовые и стоимостные затраты в массовом строительстве при высоких качественных и эксплуатационных показателях и сократит сроки строительства за счет технологии сборки.

**Расчет многоэтажного железобетонного каркасного здания с различными ограждающими конструкциями.** В качестве объекта расчета выбрано пятиэтажное железобетонное каркасное здание с двумя вариантами ограждающих конструкций: первый вариант — газобетонные стены, второй вариант — каркасно-обшивные стены (КОС). Для технического сопоставительного анализа произведен также расчет каркаса без стен («этажерка»).

#### Характеристика строительной площадки:

- Район строительства — Республика Узбекистан, Ташкентская область;
- климатический район строительства — 4 по КМК 2.01.01-94;
- Нормативное значение снежного покрова на 1 м<sup>2</sup> горизонтальной поверхности земли — 50 кг/м<sup>2</sup> для площади первого снега;
- Нормативное значение давления ветра — 38 кг/м<sup>2</sup> в 3-м ветровом районе;
- строительная площадка расположена вне зоны затопления города;
- сейсмостойкость строительной площадки, КМК 2.01.01-19;
- Сейсмичность участка по карте строительно-монтажных работ города Ташкента — 8 баллов;
- категория грунтов по сейсмическим характеристикам — 2.

#### Несущие конструкции и конструктивные элементы здания:

- конструктивное решение — каркас;
- основания для несущих конструкций здания — монолитная фундаментная плита. Бетон класса Б 25 на традиционном цементе для несущих колонн. Бетонная подготовка под фундаментные плиты производится из бетона класса Б 20 толщиной 0,5 м;
- сечение двух несущих колонн лестничной клетки —

400х400 мм из бетона класса Б 25, сечение всех остальных колонн между этажами — 400х600 мм из бетона класса Б 25, сечения ригелей несущих межэтажные плиты перекрытия и лестничные клетки, 400х400 мм из бетона класса Б 20, стена технического этажа — подвала из бетона класса Б 20 толщиной 400 мм, межэтажные плиты перекрытия, перекрытия лестниц и лестничных клеток имеют размеры толщиной 180 мм из бетона класса Б 20;

- арматура класса А3 используется во всех несущих элементах здания;
- здание прямоугольной формы, размеры в осях — 24,7×16,6 м;
- этажность здания — 5 этажей;
- 1-5 - высота этажа (от пола до пола) — 3,6 м;
- высота цокольного (подвального) этажа (от пола до пола 1 этажа) — 3,0 м.

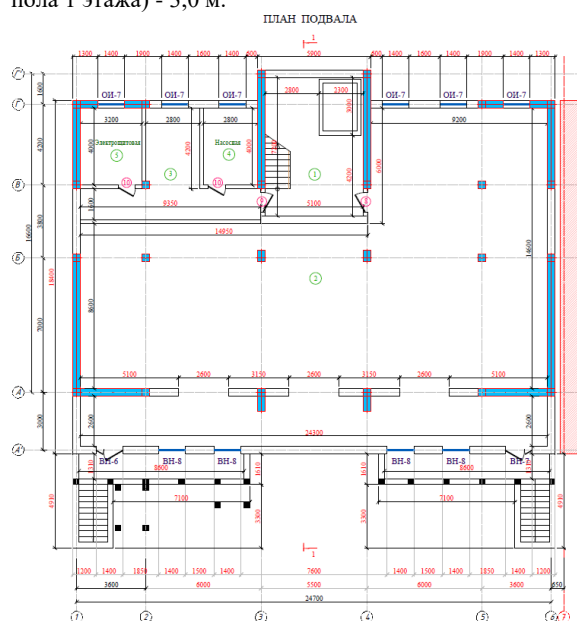


Рисунок 1. План технического этажа здания  
ПЛАН 1 - 5 ЭТАЖЕЙ

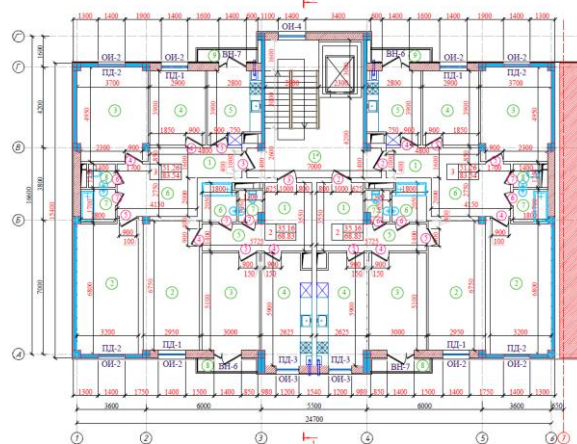


Рисунок 2. Типовой план этажа здания

**Модели объектов для проектирования.** При проведении численного анализа были сделаны расчётные работы со следующими наружными и внутренними стенами рассматриваемого здания:

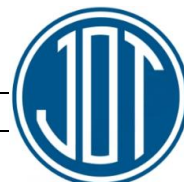


Таблица 1

## Наружные стены и их особенности

№	Типы и толщина наружных стен здания, мм	Характеристики наружных стен	Масса 1 м <sup>2</sup> наружной стены, кг, около
1	Газобетонная: - 300	Марка газобетона: - Д 800. $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ .	240 (250)
2	Каркасно-обшивная стена: - 240		80
3	Этажерка (без наружных стен)		

Таблица 2

## Внутренние стены и их особенности

№	Типы и толщина внутренних стен здания, мм	Особенности межкомнатных перегородок	Масса 1 м <sup>2</sup> внутренней перегородки, кг, около
1	Газобетонная: - 150 (+ 20, всего 170)	Марка газобетона: - Д 800. $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ .	130
2	Каркасно-обшивная перегородка: - 100 (155)		60
3	Этажерка (без внутренней стены)		

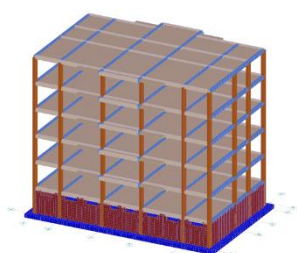


Рисунок 3. Вид расчётной модели (схемы) здания спереди

© 2019, все права защищены

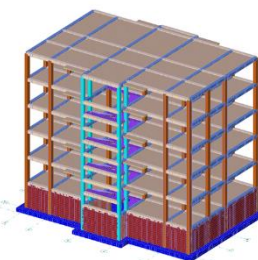


Рисунок 4. Вид расчётной модели (схемы) здания сзади

Как правило здания в сейсмических районах проектируются по схемам, при которых стены этих зданий воспринимают сейсмическую нагрузку как несущие конструкции, либо не являются несущими, а сейсмическую нагрузку воспринимает каркас здания. Однако не рекомендуется увеличивать высоту зданий, наружные стены которых воспринимают сейсмические нагрузки, более чем на 5-7 этажей. Поэтому, согласно пунктам Е и Ж, таблицы 3.1 КМК 2.01.03-19 расчёт наружных и внутренних стен в модели рассматриваемого многоэтажного здания выполняется как ненесущие и без жёсткого их закрепления в здании.

**Методы расчета.** Расчеты проводились с использованием нормативного документа КМК 2.01.03-19 «Строительство в сейсмических районах» и динамическим способом в программе ЛИРА СОФТ методом конечных элементов в перемещениях.

Деформированная схема элементов железобетонного каркаса здания приведена на рис. 5–10.

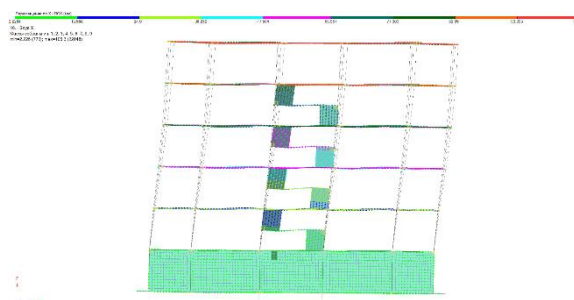


Рисунок 5. Мозаика перемещений по оси X пятиэтажного каркасного здания с наружными и внутренними стенами из газобетона; максимальное перемещение 105,33 мм.

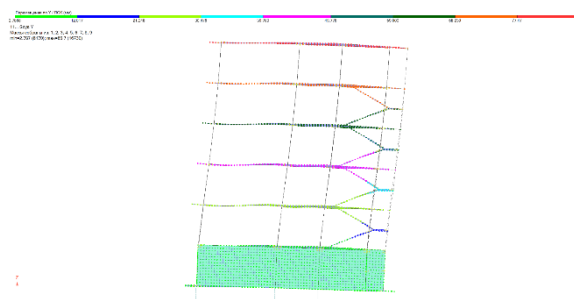
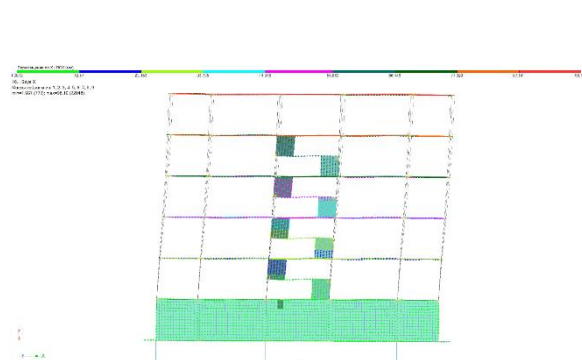
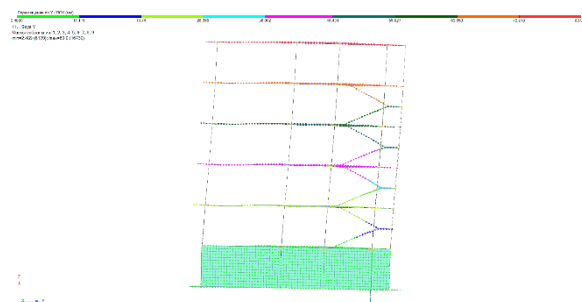


Рисунок 6. Мозаика перемещений по оси Y пятиэтажного каркасного здания с наружными и внутренними стенами из газобетона; максимальное перемещение 86,70 мм.

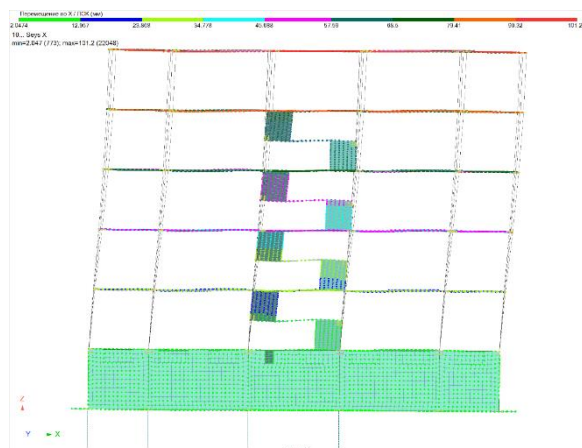




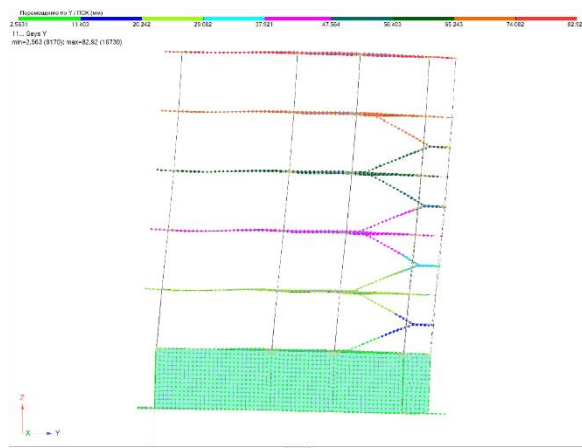
**Рисунок 7. Мозаика перемещений по оси X пятиэтажного каркасного здания без наружных и внутренних стен; максимальное перемещение 98,19 мм.**



**Рисунок 8. Мозаика перемещений по оси Y пятиэтажного каркасного здания без наружных и внутренних стен; максимальное перемещение 80,9 мм.**



**Рисунок 9. Мозаика перемещений по оси X пятиэтажного каркасного здания с наружными и внутренними каркасно-обшивными стенами; максимальное перемещение 101,23 мм.**



**Рисунок 10. Мозаика перемещений по оси Y пятиэтажного каркасного здания с наружными и внутренними каркасно-обшивными стенами; максимальное перемещение 82,92 мм.**

Приведенные выше результаты сведены в таблицу 3:

**Таблица 3**

**Результаты перемещения конструкций пятиэтажного железобетонного каркасного здания по осям X и Y**

№	Конструктивная система и размеры здания с железобетонным каркасом	Максимальное перемещение в направлении оси X, мм	Максимальное перемещение в направлении оси Y, мм
1	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними стенами из газобетона, размеры 24,7×16,6 м.	105,33	86,70
2	5-этажное каркасное здание без наружных и внутренних стен, размеры 24,7×16,6 м.	98,19	80,9
3	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними каркасно-обшивными стенами, размеры 24,7×16,6 м.	<b>101,23</b>	<b>82,92</b>

По данным второго пункта таблицы 2.6 КМК 2.01.03-19, в случаях, когда несущие элементы зданий защищены от воздействия деформаций несущих конструкций, величина перемещений зданий по оси X и Y допускается в случаях, когда значения перемещений не превышают 1/70 общей высоты здания. Высота исследуемого 5-этажного железобетонного каркасного здания составляет 21,6 м при вертикальном положении несущих элементов. В этом случае максимальное

значение перемещения составляет  $h/70=21600/70=308,57$  мм.

При расчёте зданий с наружными и внутренними стенами и без них, во всех случаях значения перемещений не превышали максимально допустимого предела.

Следует отметить, что замена газобетонной кладки на легкую КОС позволило значительно снизить общую массу здания (таблица 4).



Таблица 4

Влияние наружных и внутренних стен на общую массу 5-этажного здания

№	Конструктивная система и размеры здания с железобетонным каркасом	Масса здания, тонна
1	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними стенами из газобетона, размеры 24,7×16,6 м.	4 014,46
2	5-этажное каркасное здание без наружных и внутренних стен, размеры 24,7×16,6 м.	3 513,49
3	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними каркасно-обшивными стенами, размеры 24,7×16,6 м.	3 747,09

Из приведенных выше результатов видно, что в 5-этажных железобетонных каркасных зданиях при использовании каркасно-обшивных стен в качестве ограждающих и разделительных стен (перегородок), значения перемещений и сдвигов значительно уменьшаются по сравнению со зданиями где применяются газобетонные стены, а общая масса здания становится легче. Это, в свою очередь, повышает сейсмостойкость здания.

Также проведен анализ расхода арматуры в несущих вертикальных конструкциях – колоннах и горизонтальных конструкциях – ригелях пятиэтажного железобетонного каркасного здания (рис.11-16).

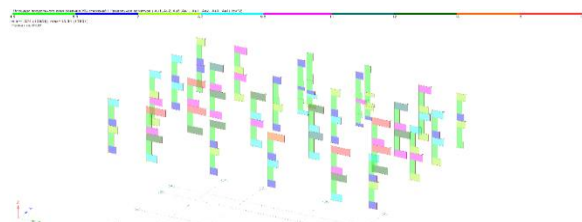


Рисунок 11. Расположение колонн и максимальная площадь армирование в колоннах на четвёртом и пятом этажах пяти этажного каркасного железобетонного здания с внутренними и наружными стенами из газобетона.

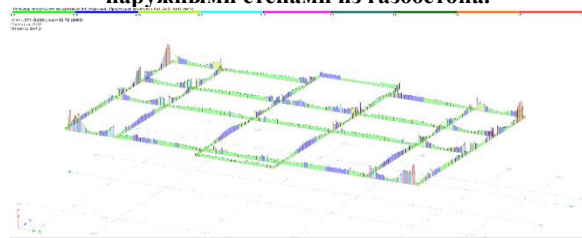


Рисунок 12. Расположение ригелей и максимальная площадь армирование на нижней грани ригелей с первого по пятые этажи пяти этажного каркасного железобетонного здания с внутренними и наружными стенами из газобетона.

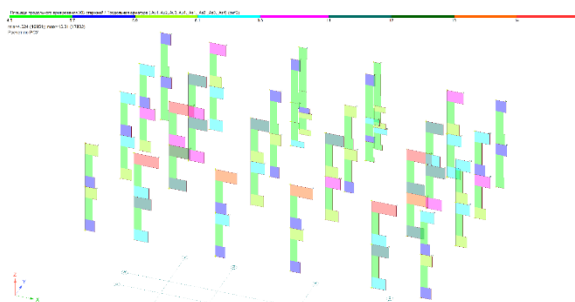


Рисунок 13. Расположение колонн и максимальная площадь армирование в колоннах на четвёртом и пятом этажах пяти этажного каркасного железобетонного здания без внутренних и наружных стен.

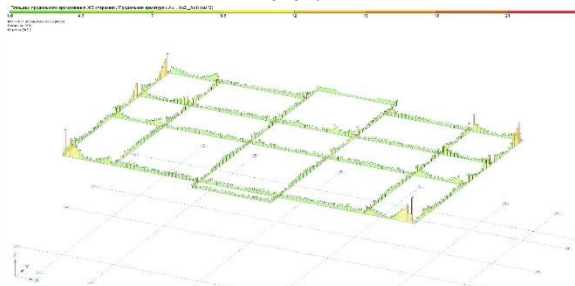


Рисунок 14.. Расположение ригелей и максимальная площадь армирование на нижней грани ригелей с первого по пятые этажи пяти этажного каркасного железобетонного здания без внутренних и наружных стен.

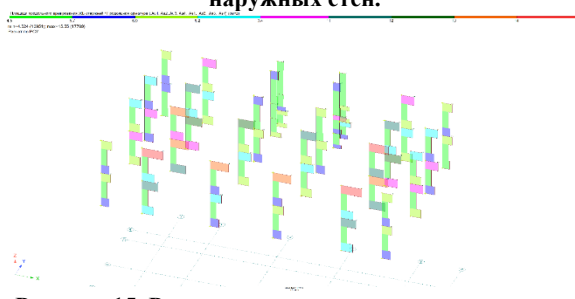


Рисунок 15. Расположение колонн и максимальная площадь армирование в колоннах на четвёртом и пятом этажах пяти этажного каркасного железобетонного здания с внутренними и наружными каркасно-обшивными стенами.

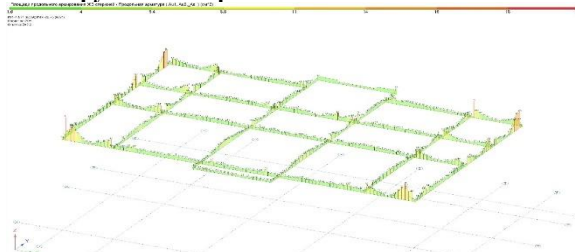


Рисунок 16. Расположение ригелей и максимальная площадь армирование на нижней грани ригелей с первого по пятые этажи пяти этажного каркасного железобетонного здания с внутренними и наружными каркасно-обшивными стенами.

Данный анализ показал, что количество используемой арматуры для несущих колонн и ригелей 5-этажного железобетонного каркасного здания снижается при замене газобетонных стен на КОС

(таблица 5). Не трудно заметить, что расход арматуры при использовании КОС за счет его облегченной массы сопоставим с расходом арматуры для здания “этажерки”.

Таблица 5

Расход арматуры в несущих конструкциях колонн и ригелей

№	Конструктивная система и размеры здания с железобетонным каркасом	Расход арматуры в колоннах, тонна	Расход арматуры в ригелях, тонна	Общий расход арматуры для колонн и ригелей здания, тонна
1	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними стенами из газобетона, размеры 24,7×16,6 м.	73,8	107,91	181,7
2	5-этажное каркасное здание без наружных и внутренних стен, размеры 24,7×16,6 м.	64,93	100,53	165,5
3	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними каркасно-обшивными стенами, размеры 24,7×16,6 м.	68,82	102,49	171,3

### 3. Заключение

1 Создана пространственная модель многоэтажного железобетонного каркасного здания с применением КОС с помощью программного обеспечения ЛИРА СОФТ и проведены численные эксперименты.

2 Определены напряженно-деформационные состояния многоэтажного железобетонного каркасного здания с применением КОС. Проведён сравнительный анализ напряженно-деформационного состояния, под воздействием сейсмических и динамических нагрузок зданий с использованием КОС и газобетонных стен.

3 При расчёте зданий с наружными и внутренними стенами и без них, во всех из них значения перемещений не превышали максимально допустимого предела. Однако величина перемещения здания по оси X была примерно на 4% выше у здания с газобетонными стенами по сравнению со зданием с каркасно-обшивными стенами. По сравнению с каркасным зданием без наружных и внутренних стен разница была всего на 3% выше чем у здания с каркасно-обшивными стенами.

4 Величина перемещений здания по оси Y, была примерно на 4,5% выше у здания с газобетонными стенами по сравнению со зданием с каркасно-обшивными стенами. При этом по сравнению с каркасным зданием без наружных и внутренних стен разница была всего на 3,5% больше в здании с каркасно-обшивными стенами.

5 В здании со стенами из газобетона общий расход арматуры для колонн и ригелей увеличился примерно на 6% по сравнению со зданием с каркасно-обшивными стенами. По сравнению с каркасным зданием без наружных и внутренних стен, общий расход арматуры в здании с каркасно-обшивными стенами был больше всего на 3,5%.

6 При использовании стен из газобетона масса 5-этажного здания увеличилась примерно на 7,1% по сравнению со зданием где применяется каркасно-

обшивная стена. По сравнению с массой каркасного здания без наружных и внутренних стен эта разница в массе была на 6,6% больше у здания с каркасно-обшивными стенами.

### Использованная литература / References

[1] «Современное здание. Конструкции и материалы», Большой справочник, 2006.

[2] Альбом технических решений по применению изделий из автоклавного газобетона торговой марки «Н+Н» в строительстве жилых, общественных и промышленных зданий, Санкт-Петербург, 2011.

[3] Альбом технических решений КНАУФ АКВАПАНЕЛЬ® Наружная стена. Наружные несущие каркасно-обшивные стены с каркасом из стальных тонкостенных холодногнутых оцинкованных профилей с применением материалов КНАУФ, 2020.

[4] A.A. Khodjaev, I.S. Karimjonov. Modern energy-efficient lightweight external wall structures for multi-storey buildings // Technical science and innovation 2023, №1. p. 59-64.

[5] Khodjaev A.A., Karimjonov I.S. Reducing the energy consumption of multi-storey buildings by dint of new solutions for external structures // “The Scientific-Practice Journal of Architecture, Construction and Design”, 2022, №4. p. 182-187.

### Информация о авторах/ Information about the authors

Abbos Khodjayev Министерство высшего образования, науки и инноваций  
<https://orcid.org/0009-0000-5159-2972>

Ibrokhim Karimjonov Ташкентский государственный транспортный университет, таянч докторантура изланувчиси  
<https://orcid.org/0009-0001-7326-5582>

